特别说明

此资料来自百度文库（http://wenku.baidu.com/）

您目前所看到的文档是使用的**抱米花百度文库下载器**所生成

此文档原地址来自

http://wenku.baidu.com/view/1be23b28cfc789eb172dc8e0.html

感谢您的支持

抱米花

http://blog.sina.com.cn/lotusbaob

VISIT…

LANZAROTE Caliente.com

CFD与FLUENT

于茂军

报告提纲

- CFD是什么
- FLUENT程序简介
- 前处理软件GAMBIT的使用
- FLUENT主体程序使用
- FLUENT后处理
- 其它

CFD是什么

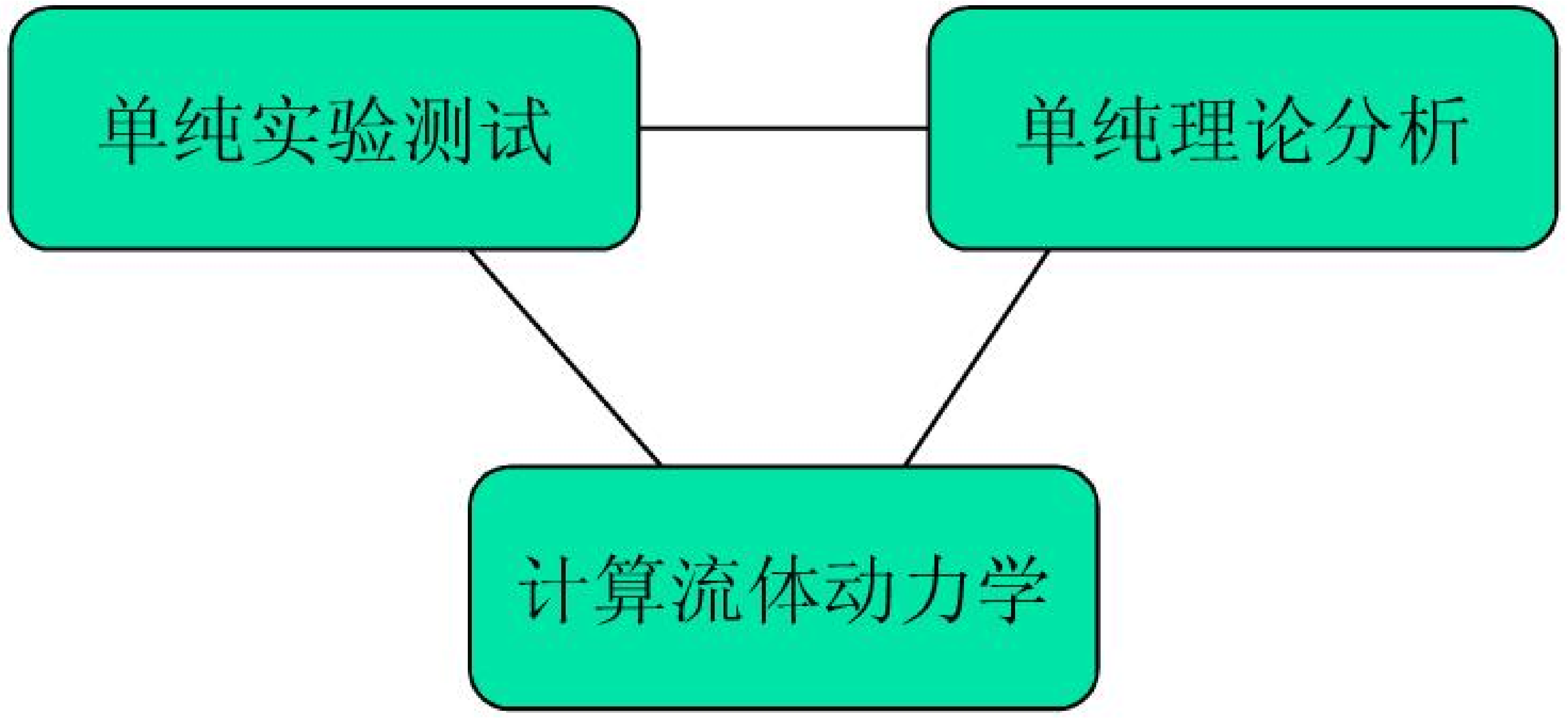
1、CFD是什么

- 计算流体动力学（CFD）通过求解流场控制方程组，以及计算机数值计算和图像显示的方法，在时间和空间上定量描述流场的数值解，从而达到对物理问题研究的目的。
- 应用CFD可以预测流体的行为，同时还可以得到传质（如分离和溶解），传热，相变（如凝固和沸腾），化学反映（如燃烧），机械运动（涡轮机），以及相关结构的压力和变形（如风中桅杆的弯曲）等等的性质。

CFD的基本思想

- CFD的基本思想可以归结为：把原来在时间域及空间域上连续的物理量的场，如速度场和压力场，用一系列有限个离散点上的变量值的集合来代替，通过一定的原则和方式建立起关于这些离散点上场变量之间关系的代数方程组，然后求解代数方程组获得场变量的近似值。
- 最理想的数值模拟结果应可以形象地再现流动情景，与做实验没有什么差别。

数值模拟、实验、理论分析的关系

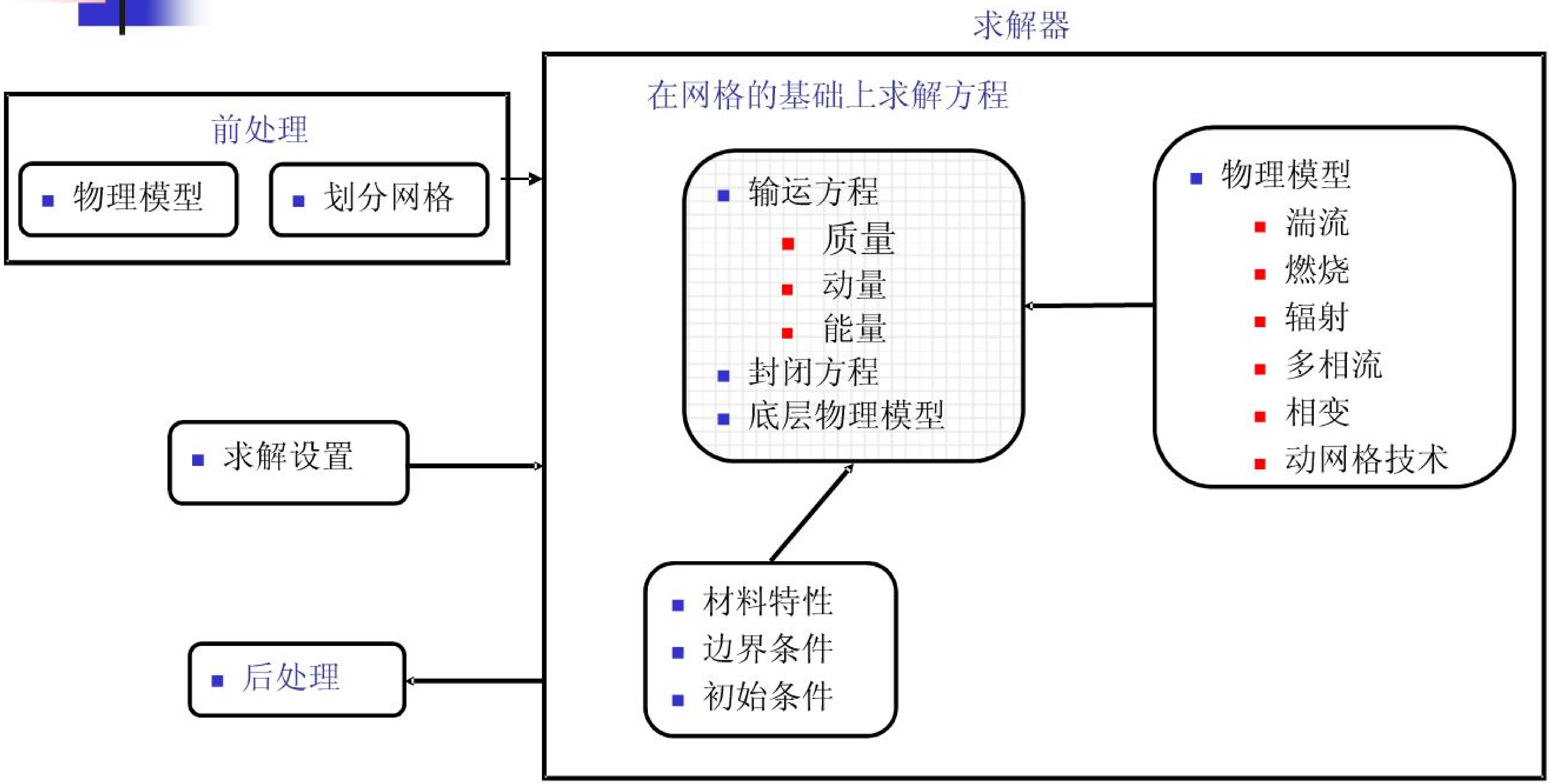


- 做理论的目的是为了尽可能了解事物本质；
- 做数值模拟则是在尽可能了解的基础上近似，用求解的方法来反演事实，这肯定是不准确的，但如果方法正确，应该是近似准确的；
- 数值模拟的结果应该采用实验来进行验证。

CFD的局限性

- 数值解法是一种离散近似的计算方法，依赖于物理上合理、数学上适用、适合于在计算机上进行计算的离散的有限数学模型，且最终结果不能提供任何形式的解析表达式，只能是有限个离散点上的数值解，并有一定的误差；
- 它不像物理模型实验一开始就能给出流动现象并定性地描述，往往需要由原体观测或物理模型试验提供某些流动参数，并需要对建立的数学模型进行验证；
- 程序的编制及资料的收集、整理和正确利用，在很大程度上依赖于经验和技巧。

CFD工作过程


求解器
在网格的基础上求解方程
前处理
物理模型
划分网格
输运方程
质量
动量
能量
封闭方程
底层物理模型
物理模型
湍流
燃烧
辐射
多相流
相变
动网格技术
求解设置
材料特性
边界条件
初始条件
后处理

CFD的基本步骤

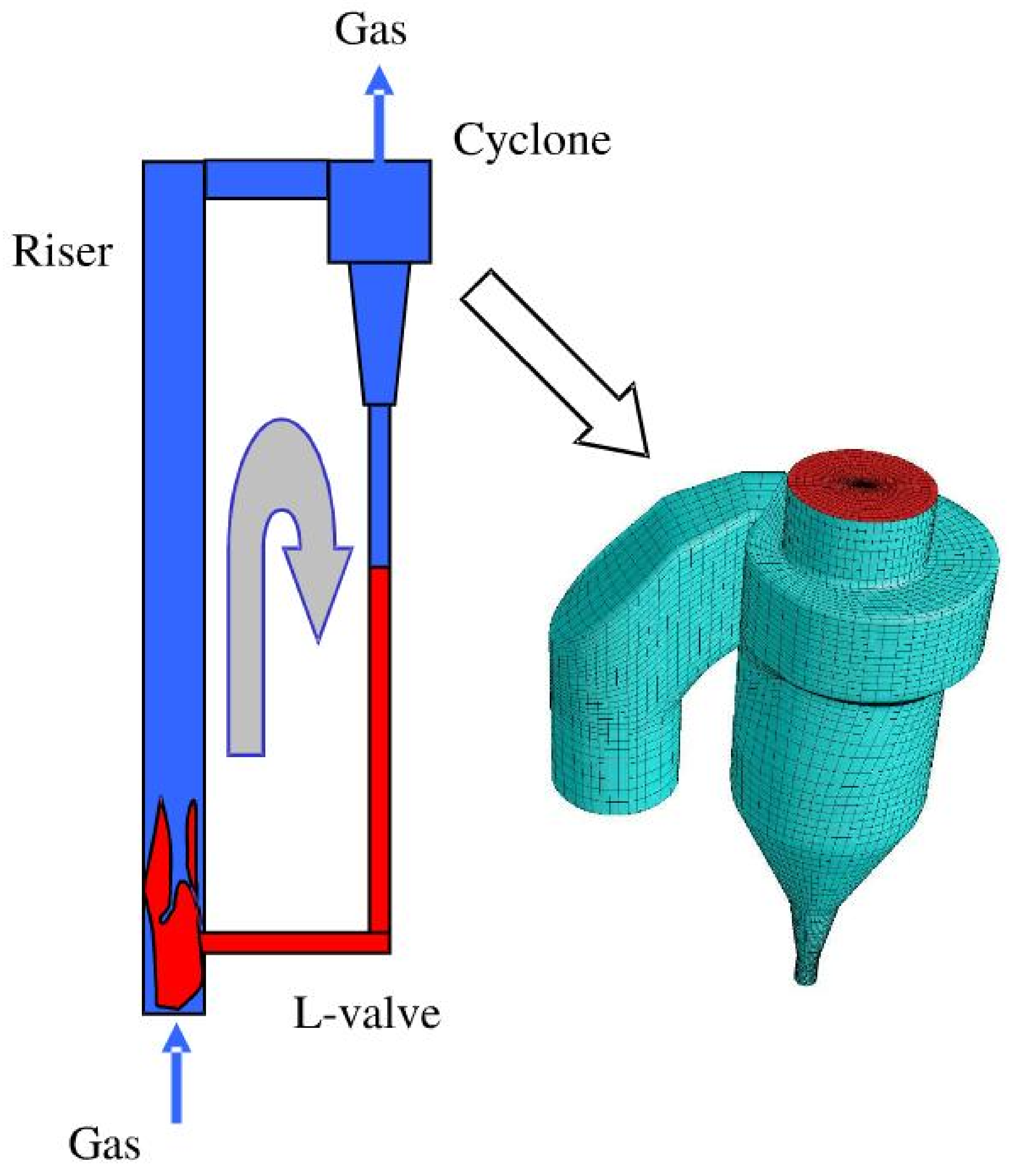
- 分析问题及前处理
  1. 确定数值模拟的目标
  2. 确定计算区域
  3. 建立数值模拟物理模型和网格
- 求解执行过程
  4. 建立数学模型
  5. 计算并监控结果
- 后处理
  6. 检查结果
  7. 修正模型

确定数值模拟的目标

- 需要得到的结果以及结果的用途
  - 建立物理模型时需要考虑的问题：
    - 在分析中需要建立什么形式的物理模型?
    - 采取什么样的简化措施？
    - 是否需要采用新的修正模型?
      - FLUENT 6 中用User-defined functions (C语言编写)实现
- 需要什么样的计算精度？
- 对计算时间有无要求?

确定计算区域

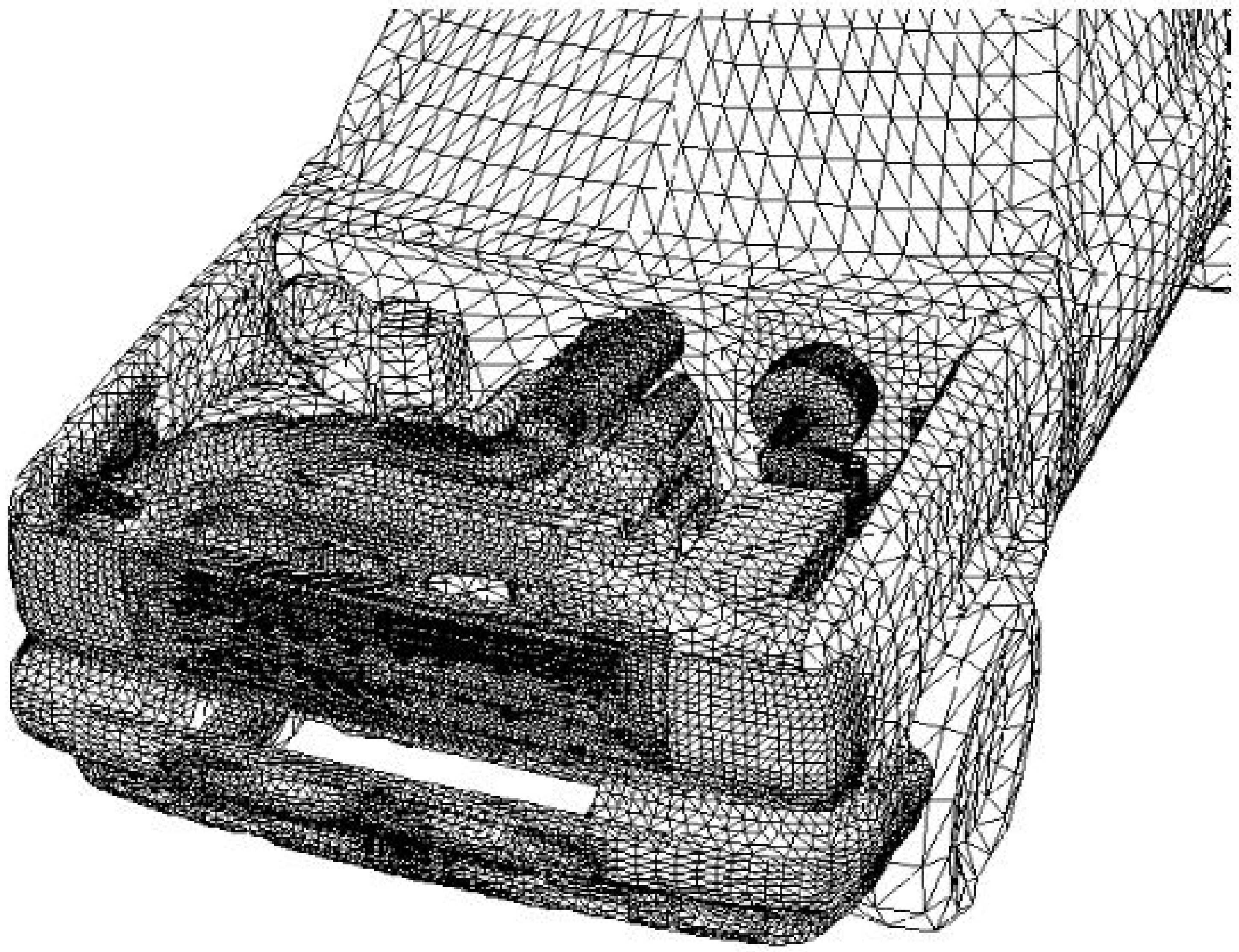
- 怎么样将研究对象进行孤立化处理?
- 计算区域的初始和结束位置?
  - 在计算区域的边界上是否有存在的边界信息?
  - 边界的形式能否容纳这些信息?
  - 是否可以根据实验测量得到边界的信息?
- 计算区域可否简化成二维或者轴对称形式?

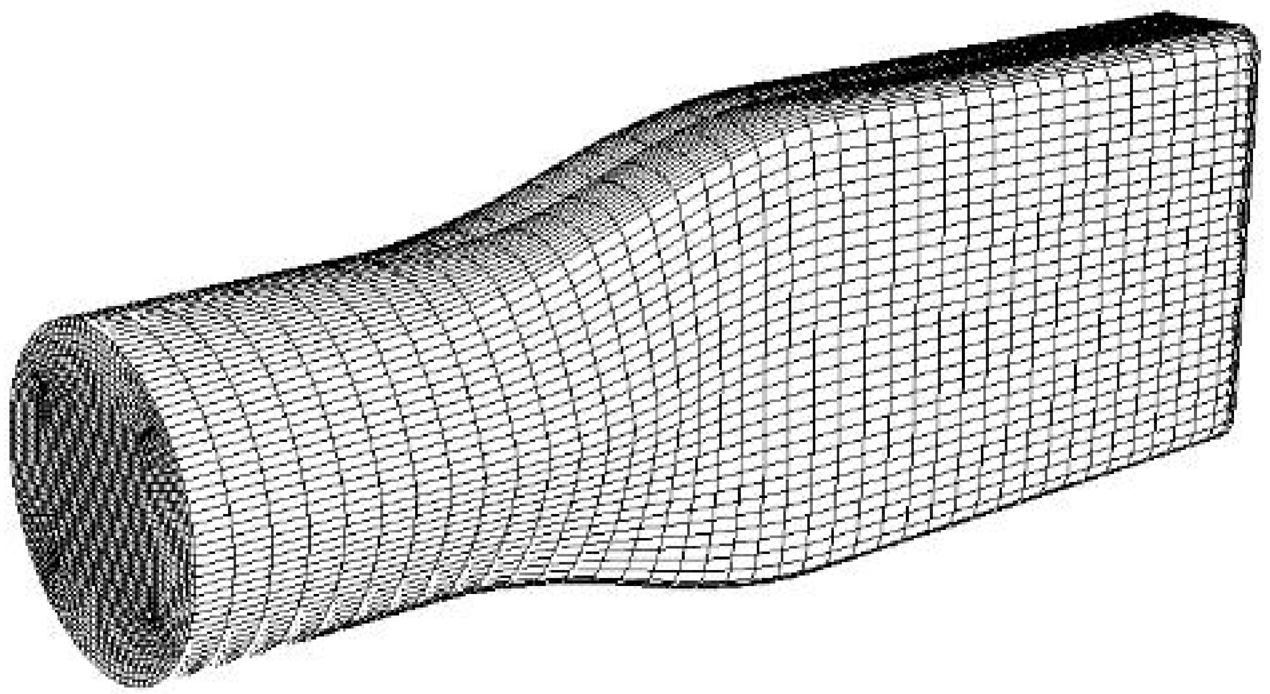


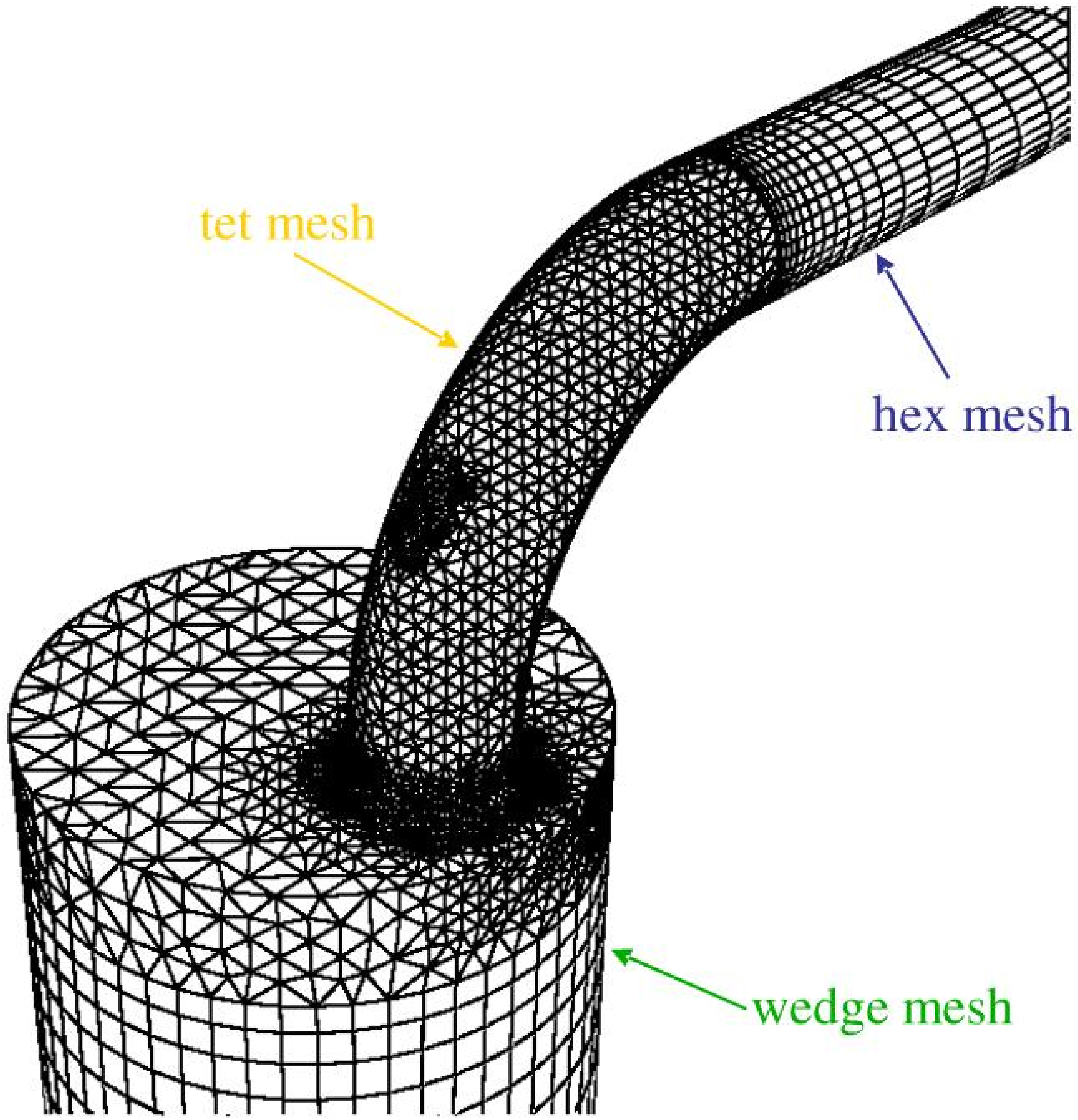
建立数值模拟物理模型和网格

- 能否采用结构化的网格？
  - 几何形状以及流动的复杂程度?
- 在各个控制区域内需要什么样的网格精度
  - 对于这个几何形体需要什么样的网格精度?
  - 大的网格梯度是否能预测流场?
  - 是否需要采用网格自适应技术?
- 计算机的内存容量是否满足要求?
  - 需要多少的计算网格?
  - 计算模型的数量?

模型和网格欣赏







Hybrid mesh for an
IC engine valve port

建立数学模型

- 对于一个给定的问题，需要解决的问题有：
  - 选择合适的物理模型
    - 湍流，燃烧，多相流等
  - 确定材料的特性
    - 流体
    - 固体
    - 混合物
  - 给定操作工况
  - 给定所有边界条件
  - 给定初始条件
  - 给定数值计算的控制参数
  - 设置监视点

计算并监控结果

- 迭代求解离散方程组.
  - 通过迭代计算使结果收敛
- 什么情况达到收敛：
  - 求解变量在连续几个迭代次数中不发生改变：
    - 从残差方面可以大体监视这一过程
  - 满足守恒定律
- 收敛解的精度取决于：
  - 物理模型的简化程度和精度
  - 网格的精度

检查结果

- 检查结果并提取出有效数据.
  - 可视化工具能得到:
    - 整个流场的特性
    - 发生流场突变的位置
    - 流场的关键特征
  - 数学报告工具能够得到:
    - 力和动量
    - 界面交换系数
    - 表面和体上变量的积分值
    - 流量平衡关系

修正模型

- 物理模型是否合适
  - 流动的湍流程度
  - 流动是否为非稳定流动
  - 是否需要考虑压缩性
  - 是否需要考虑流体的涡结构（3D）
- 边界条件是否合适
  - 所选取的计算区域是否能满足问题要求
  - 边界条件是否合适
  - 边界上变量值是否合理
- 网格的精度是否满足要求
  - 能否通过网格的自适应技术提高计算精度
  - 网格是否是独立于计算之外
  - 对近壁处的处理是否需要修正

FLUENT中CFD过程的实现

- 创建几何模型和网格模型（在GAMBIT或其它前处理软件中完成）；
- 启动FLUENT求解器。
- 导入网格模型；
- 检查网格模型是否存在问题；
- 选择求解器及运行环境；
- 决定计算模型，即是否考虑热交换，是否考虑粘性等；
- 设置材料特性；
- 设置边界条件；
- 调整用于控制求解的有关参数；
- 初始化流场；
- 开始求解；
- 显示求解结果；
- 保存求解结果；
- 如有必要，修改网格或计算模型，重复上述过程重新进行计算。

FLUENT程序简介

FLUENT所能求解的问题

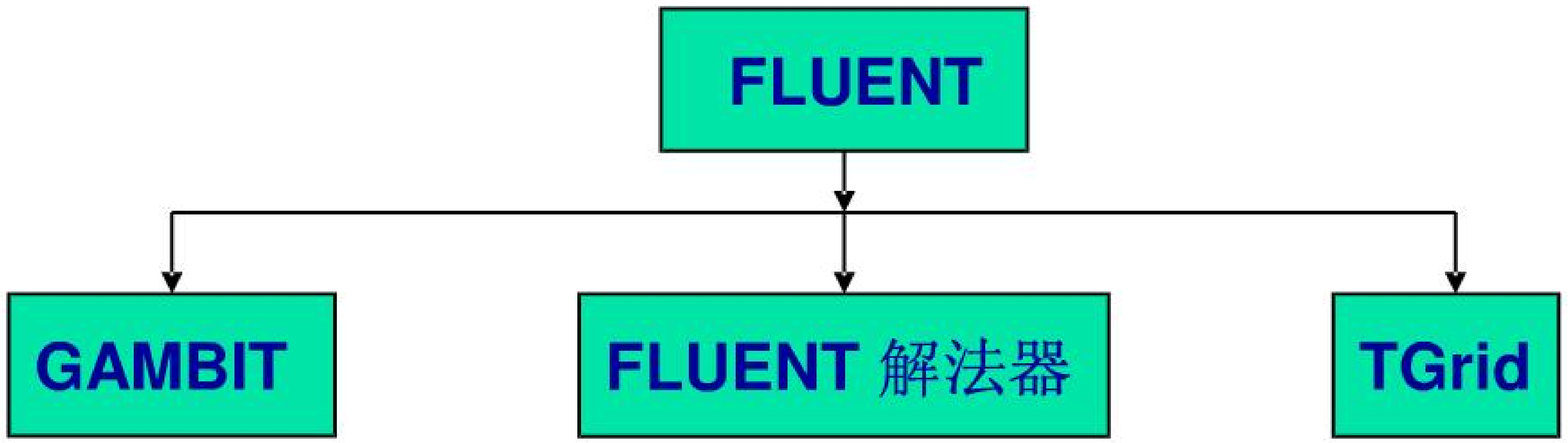
- 采用三角形、四边形、四面体、六面体及其混合网格计算二维和三位流动问题；计算过程中，网格可以自适应
- 可压缩与不可压缩流动问题
- 稳态和瞬态流动问题
- 无粘流，层流及湍流问题
- 牛顿流体及非牛顿流体
- 对流换热问题（包括自然对流和混合对流）
- 导热与对流换热耦合问题
- 辐射换热
- 化学组分混合与反应
- 用Lagrangian 轨道模型模拟稀疏相（颗粒，水滴，气泡等）
- 两相流问题
- 复杂表面形状下的自由面流动

FLUENT的本质

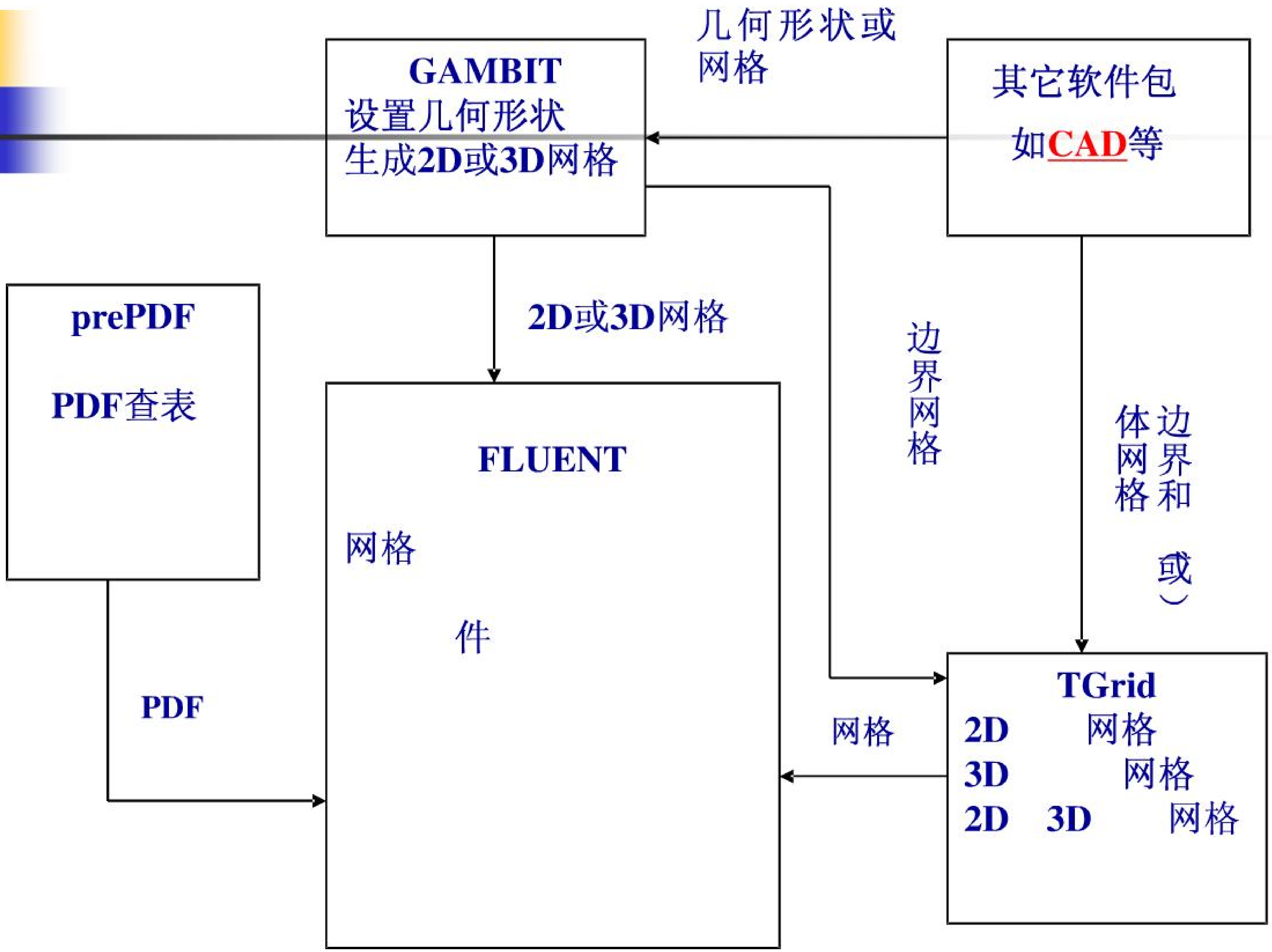
- Fluent本质是做CFD计算
- fluent上所有的面板，最基本的功能就是实现两个目的：
  - 1).选择问题的物理和数值方法（数值算法、粘性模型、辐射、多相等）；
  - 2).边界的处理（fluent给定的各种边界，UDF）

FLUENT基本程序结构

- **FLUENT**程序软件包应该包括以下几个部分：

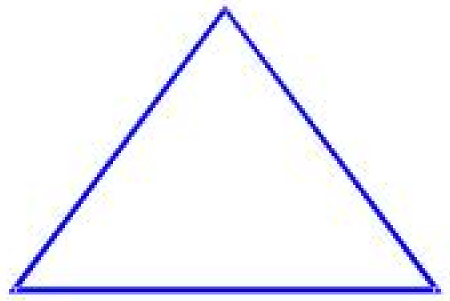


- GAMBIT，网格生成
- TGrid，额外的处理器，用于从现有的边界网格生成体网格
- Gridgen前处理器
- FLUENT解法器
- prePDF，用于模拟PDF燃烧过程


GAMBIT
设置几何形状
生成2D或3D网格
几何形状或
网格
其它软件包
如CAD等
prePDF
PDF查表
2D或3D网格
边
界
网
格
体边
网界
格和
或
FLUENT
网格
件
PDF
网格
TGrid
2D 网格
3D 网格
2D 3D 网格

FLUENT基本控制体形状

二维网格：

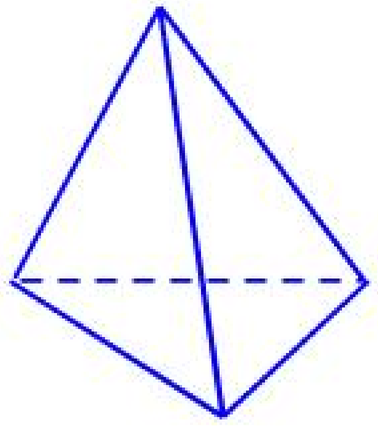


triangle

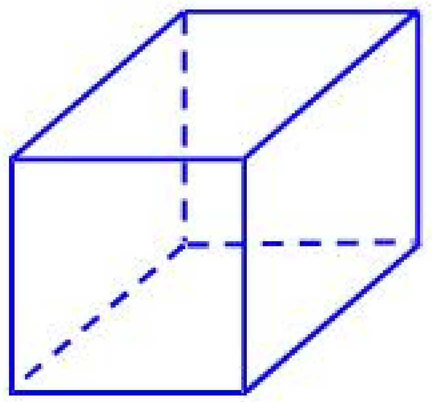


quadrilateral

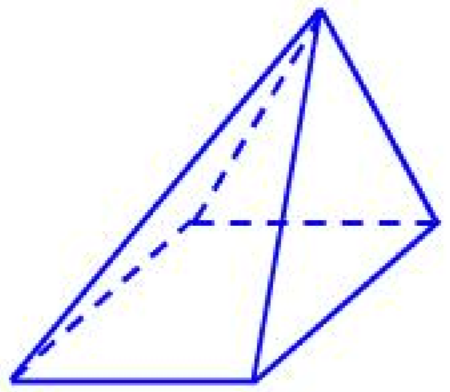
三维网格：



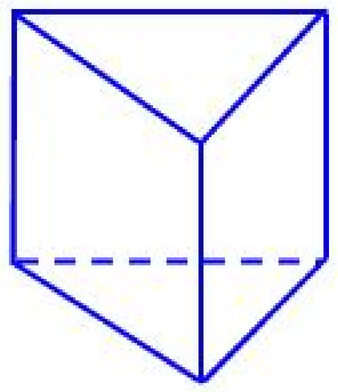
tetrahedron



hexahedron



pyramid



prism or wedge

FLUENT中的湍流模型

湍流流动模型很多，但大致可以归纳为以下三类：

- 湍流输运系数模型

  模型的任务就是给出计算湍流粘性系数的方法。根据建立模型所需要的微分方程的数目，可以分为零方程模型（代数方程模型），单方程模型和双方程模型。

- 第二类是抛弃了湍流输运系数的概念，直接建立湍流应力和其它二阶关联量的输运方程。

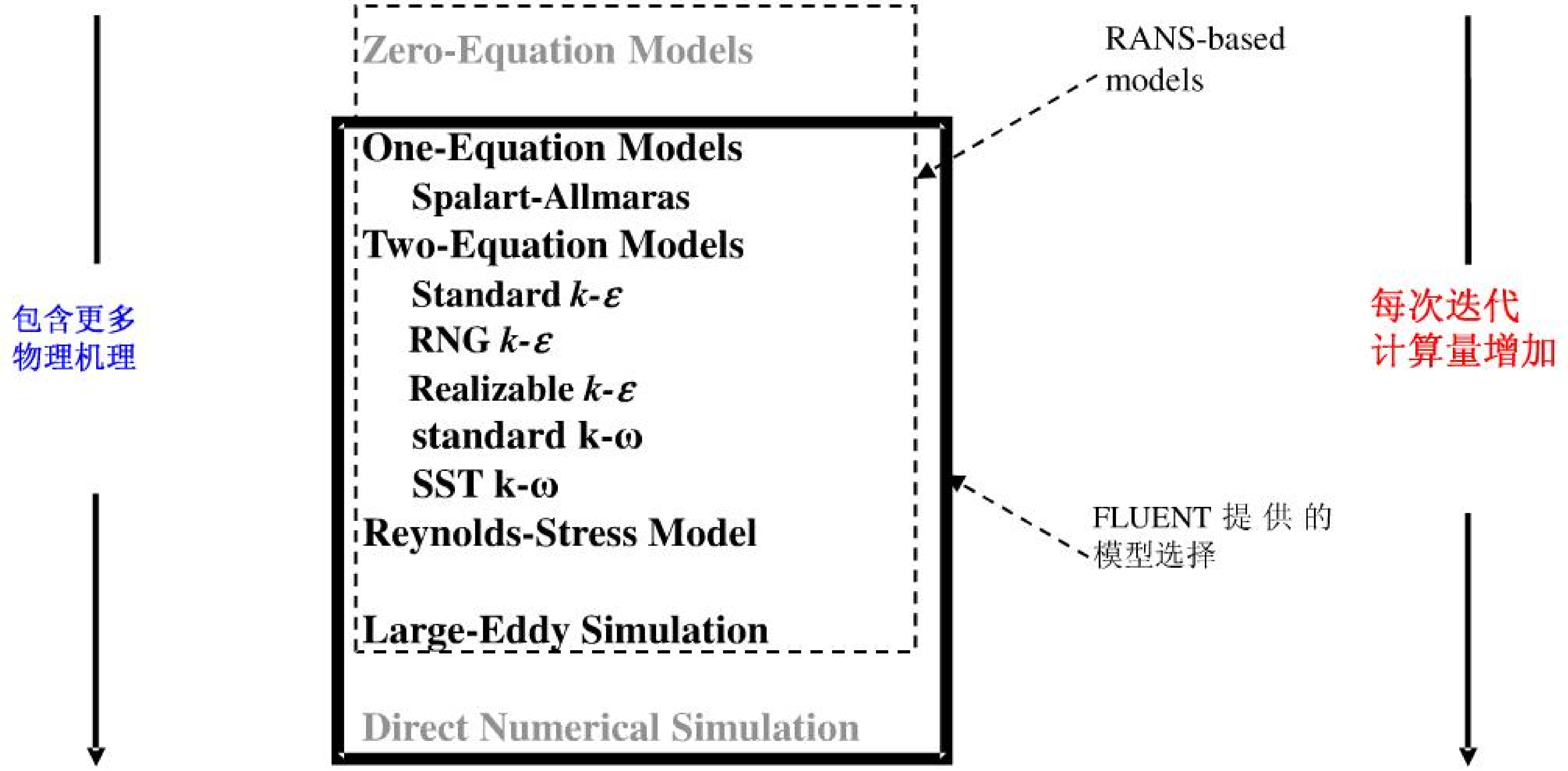
- 大涡模拟

  前两类是以湍流的统计结构为基础，对所有涡旋进行统计平均。大涡模拟把湍流分成大尺度湍流和小尺度湍流，通过求解三维经过修正的**Navier-Stokes**方程，得到大涡旋的运动特性，而对小涡旋运动还采用简化的亚格子模型（**SGS**）。

FLUENT中的湍流模型

- 实际求解中，选用什么模型要根据具体问题的特点来决定。选择的一般原则是流体是否可压，精度要求，应用简单，节省计算时间，同时也具有通用性。
- **FLUENT**提供的湍流模型包括：
- 单方程（**Spalart-Allmaras**）模型、
- 双方程模型（基于湍流动能和扩散率：标准**κ-ε**模型、重整化群**κ-ε**模型、带漩流修正的**Realizable κ-ε**模型；基于湍流能量方程和扩散速率方程：标准**k-ω**模型，剪切压力传输（**SST**） **k-ω**模型）
- 雷诺应力模型
- 大涡模拟（**3D**）

FLUENT中的湍流模型



湍流模型优缺点

模型名字	优点	缺点
Spalart-Allmaras	计算量小，对一定复杂程度的边界层问题有较好效果	计算结果没有被广泛测试，缺少子模型，如考虑燃烧或浮力问题
标准 **k-ε**模型	应用多，计算量合适，有较多数据积累和相当精度	对于流向有曲率变化，较强压力梯度，有旋问题等复杂流动模拟效果欠缺
RNG k-ε模型	能模拟射流撞击，分离流，二次流，旋流等中等复杂流动	受到涡旋粘性各向同性假设限制
Realizable k-ε模型	和**RNG**模型差不多，还可以模拟圆口射流问题	受到涡旋粘性各向同性假设限制
雷诺应力模型	考虑的物理机理更仔细，包括了湍流各向异性影响	**CPU**时间长（**2～3**倍），动量和湍流量高度耦合。

湍流模型优缺点

模型名字	优点	缺点
标准 k-ω模型	适用于低雷诺数，可压缩性和剪切流	
SST k-ω模型	独立于k－e模型之外，在近壁自由流中有广泛的应用范围和精度	

FLUENT中的求解方程

- 对于所有流动，FLUENT都求解质量和动量守恒方程。对于包含传热或可压性流动，还需要增加能量守恒方程。
- 质量守恒方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = S_m$$

动量守恒方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial c_j} + \rho g_i + F_i$$

能量方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \frac{\partial}{\partial x_i}(u_i(\rho E + p)) = \frac{\partial}{\partial x_i}(k_{eff}\frac{\partial T}{\partial x_i} - \sum_{j'} h_{j'} J_{j'} + u_j(\tau_{ij})_{eff} + S_h$$

FLUENT中的求解方法

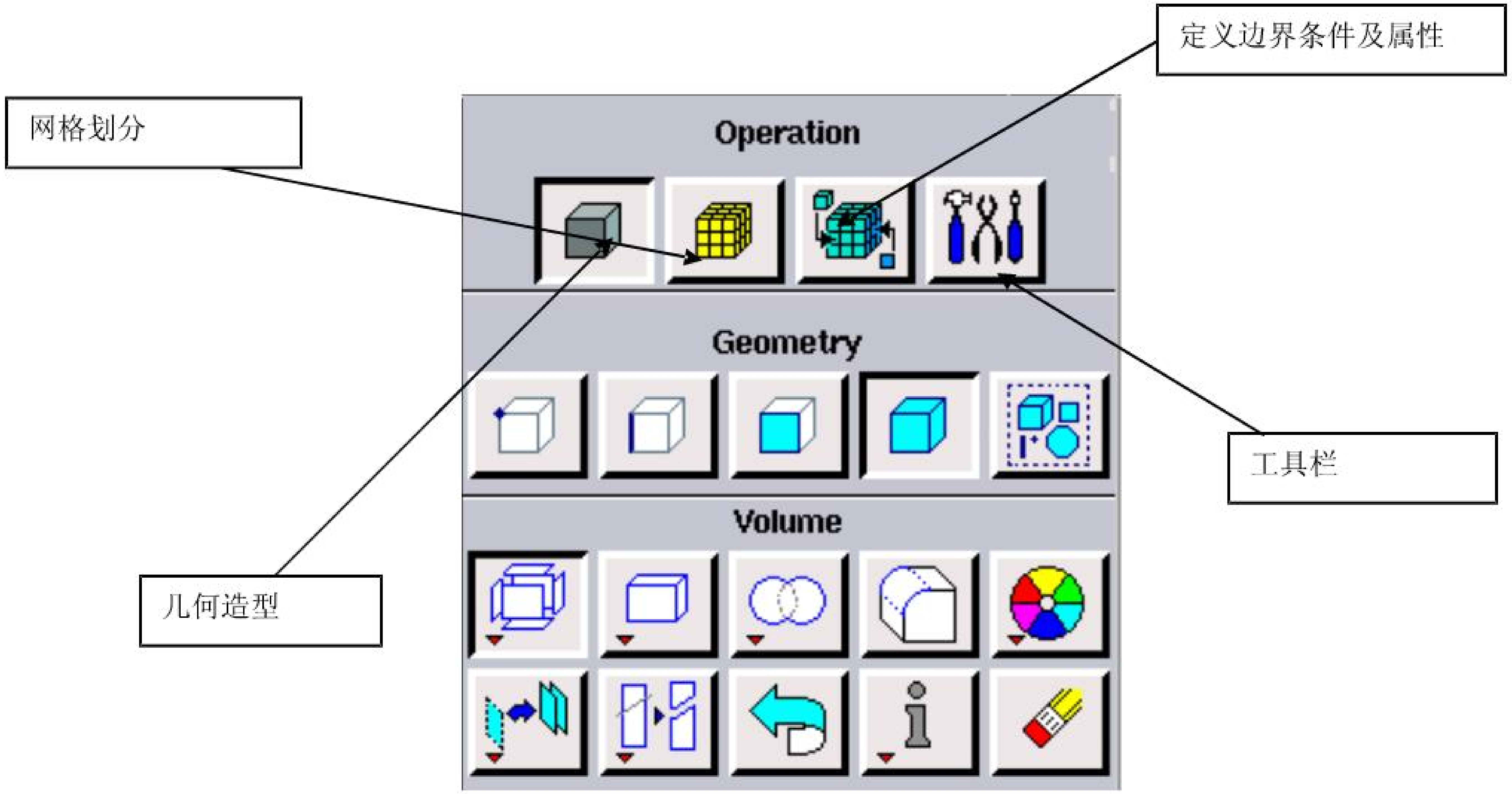
- 耦合求解，指同能量方程一起求解，主要是同NASA共同开发。而分离求解是动量方程、压力方程和能量方程分开单独求解，迭代求解。耦合求解精度高，而并行求解一般精度低。
- 非耦合求解　　不可压缩或压缩性不强的流体流动
- 耦合隐式求解　高速可压缩流动
- FLUENT默认设置是非耦合求解，但对于高速可压流动，有强的体积力（浮力或离心力）的流动，求解问题时网格要比较密，建议采用耦合隐式求解方法，可以耦合求解能量和动量方程，能比较快地得到收敛解。缺点是需要的内存比较大（是非耦合求解迭代时间的1.5-2倍）
- 耦合显式求解（收敛时间比较长 ），前身为NASA RANPANT程序。

前处理软件GAMBIT的使用

网格选择

- 网格选择需要考虑因素
  - 1 建模时间
  - 2 计算花费，一般对于同一几何体三角形/四面体网格元素比四边形/六面体的数目要少。但是后者却能允许较大的纵横比，因此对于狭长形的几何体选择该种网格类型。
  - 3 数字发散，引起发散的原因是由于系统的截断误差，如果实际流场只有很小的发散，这时的发散就很重要。

Gambit的命令面板



网格质量评价标准

- 网格是CFD模型的几何表达形式，也是模拟与分析的载体。网格质量对CFD计算精度和计算效率有重要影响。对于复杂的CFD问题，网格极易出错，因此必须对网格生成方式给予足够的关注。
- 网格质量本身与具体问题的具体几何特性、流动特性及流场求解算法有关。因此，网格质量最终要由计算结果来评判，但是误差分析以及经验表明，CFD计算对计算网格有一些一般性的要求。

网格质量评价标准

- 最基本的要求：所有网格点的Jacobian必须为正值，即网格体积必须为正。
- 光滑性：相邻网格元素体积的变化过大，容易引起较大的截断误差，从而导致发散。
- 元素形状：主要包括倾斜和纵横比。一般纵横比要小于5:1。
- 流场：很倾斜的网格在流动的初始区域是可以的，但在梯度很大的地方就不行。
- 节点密度和聚变：一般来说任何流管都不应该用少于5个的网格元素来描述。

体网格划分

- 选定一个体，体的形状和拓扑特征以及面上的点的类型最终决定了可采用的划分类型和策略
- 第一：定义元素类型
  - Hex 六面体
  - Hex/Wedge 六面体和楔体
  - Tet/Hybrid 四面体

体网格划分

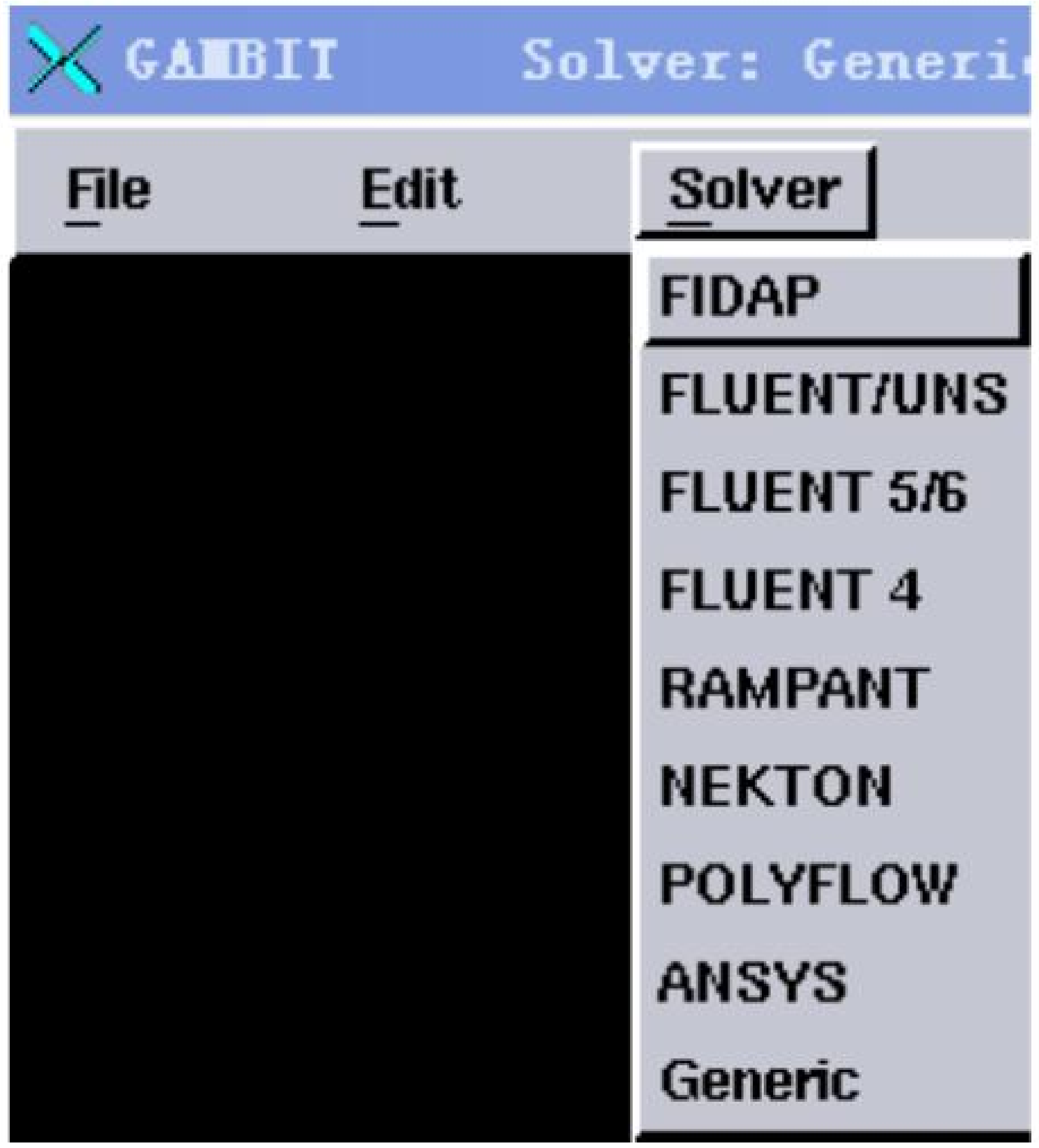
- 第二：指定划分策略
  - Map/Hex 产生规则的结构化六边形网格单元
  - Submap/hex 把一个不是mappable的体划分为mappable区域，在各个区域中产生规则的结构化的六边形网格单元
  - Tet Primitive /hex 把一个四面体分成四个六面体区域，在每个区域产生结构化网格
  - Cooper /hex(hex/wedge) 对指定的源面上的节点模式进行扫掠，从而形成体网格
  - TGrid/(Tet/Hybrid) 主要采用四面体单元，但是在恰当的地方也用六面体或者，锥体，楔体等单元

网格加密技术

- 1）在做网格时区域分块进行局部加密。
- 2）利用FLUENT中的网格自适应技术加密。

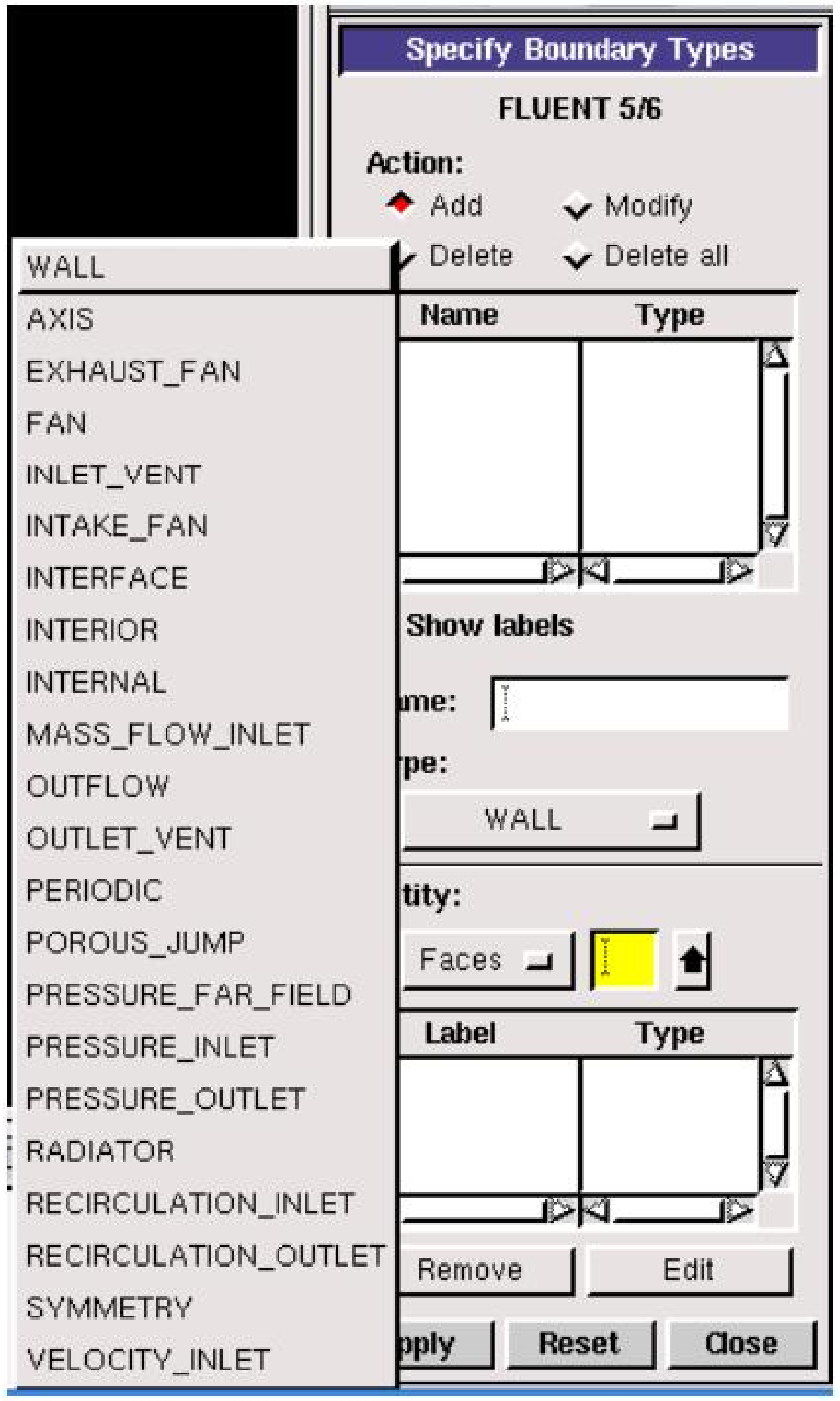
GAMBIT中边界条件的定义

- 选择求解器
- 针对求解器选择不同的边界条件定义器



GAMBIT中边界条件的定义

- 选择边界对应的几何体
  - 默认值：线、面、体
- 选择边界的类型.
  - 鼠标直接选取.
- 对定义好的边界可以再操作
  - 更改、删除.



FLUENT主体程序使用

FLUENT中的网格

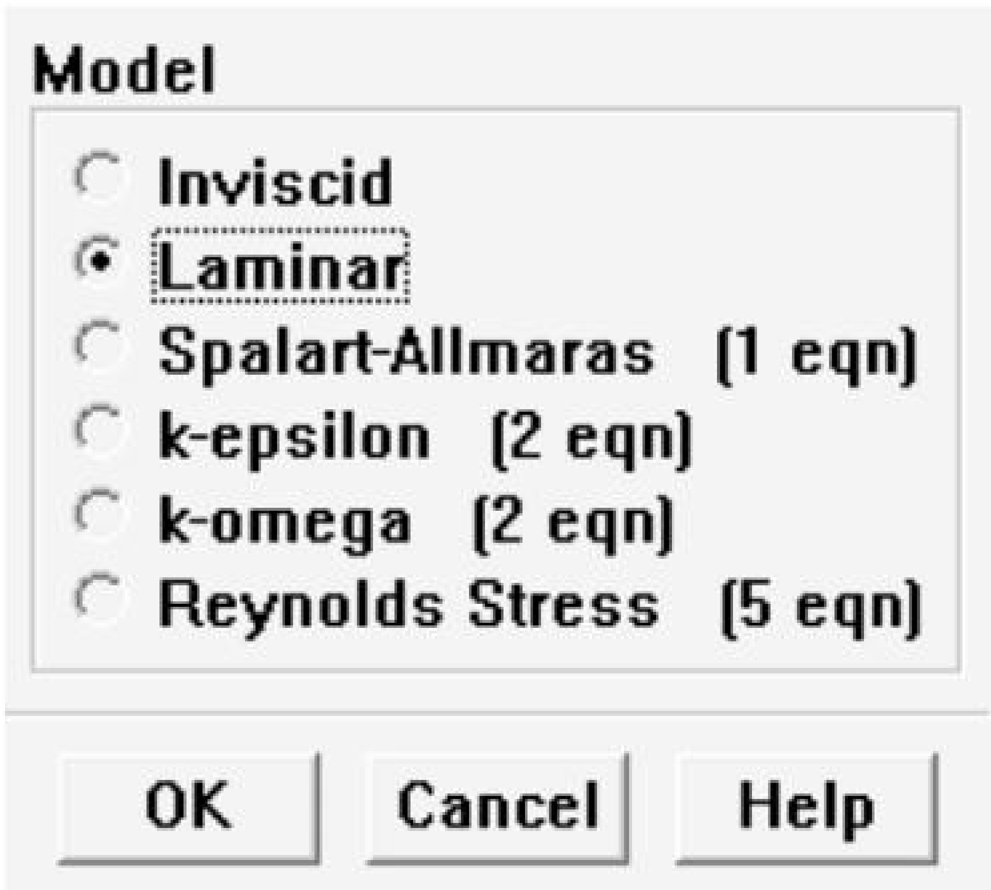
- 网格检查：在读入网格检查网格，看是否存在问题。
- 负体积的存在说明存在连接不正确的地方，可以通过Iso-Value Adoption在图形窗口中显示出错的区域。进行解算前必须将这些负体积区域去除。
- 报告网格的统计信息：1，网格尺寸：节点、面、单位、分区的数目，grid-info-size。（分区用于并行算法）如果对每个区域内的信息有兴趣，选择grid-info-zone。如果你使用的是对偶型的显式解算器，每一网格级别的网格信息将被显示。2，内存信息，你可以得到系统内存信息的的使用情况。Grid-info-memory usage 。
- 修改网格

```
Grid Check

 Domain Extents:
   x-coordinate: min (m) = 0.000000e+000, max (m) = 6.360000e-002
   y-coordinate: min (m) = 0.000000e+000, max (m) = 2.400000e-002
 Volume statistics:
   minimum volume (m3): 5.930594e-008
   maximum volume (m3): 2.546209e-007
     total volume (m3): 1.022400e-003
 Face area statistics:
   minimum face area (m2): 2.000000e-004
   maximum face area (m2): 7.035182e-004
```

FLUENT中湍流模拟的设置

- 激活粘性模型面板上的湍流模型（Spalart-Allmaras，k-epsilon，k-ω，Reynolds Stress or Large Eddy Simulation ）,如果选择k-epsilon模型，将需要继续选择采用标准模型、重整化群模型或可实现模型中的一种。
- 如果流动问题中包含壁面，选择或者雷诺应力模型，在粘性模型面板上选择近壁处理方式。近壁处理方式包括：标准壁面函数；非平衡壁面函数和双层区模型。



FLUENT中湍流模型参数设置

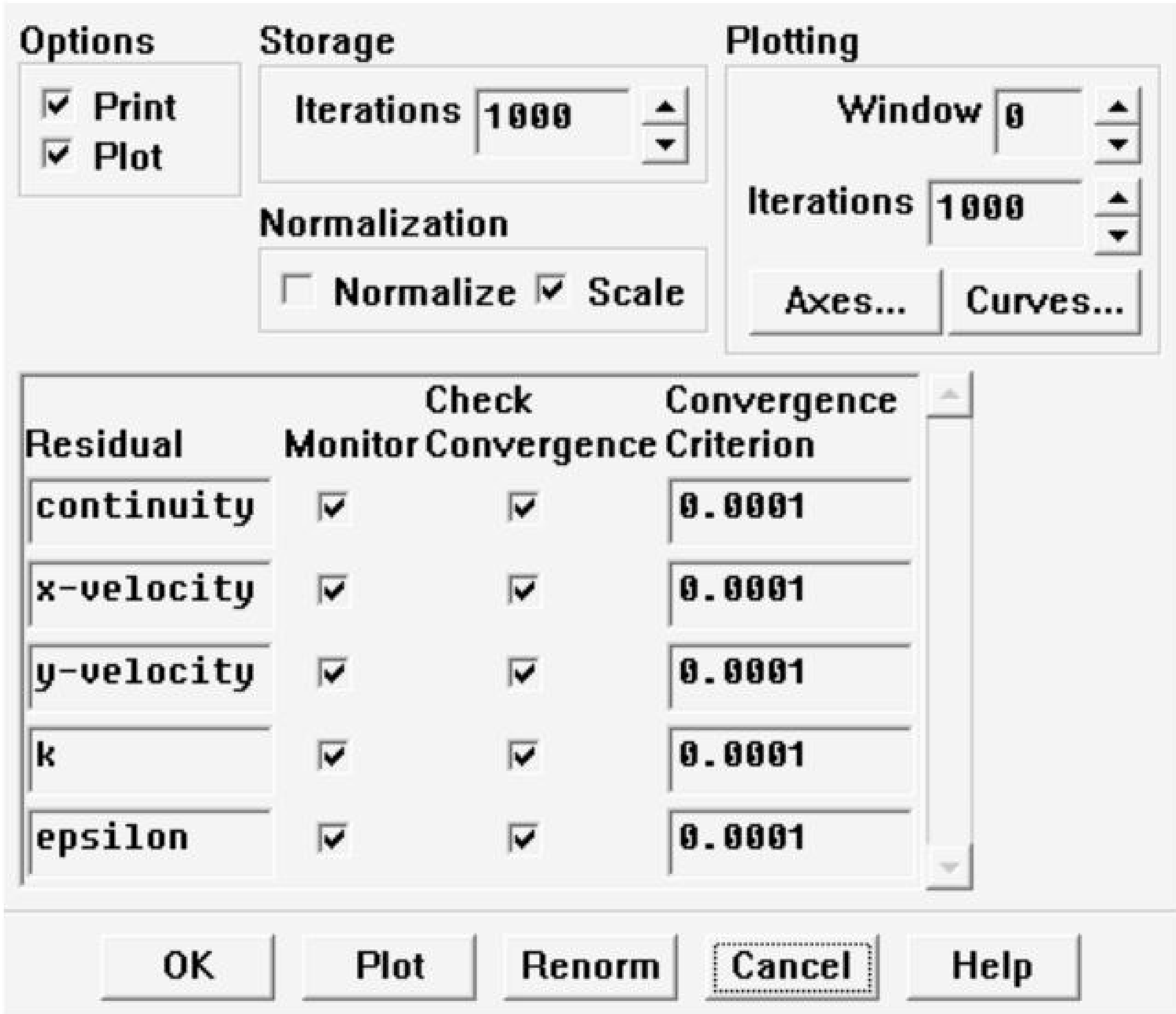
- 湍流强度 $I \equiv \frac{u'}{u_{\rm avg}} = 0.16(\mathrm{Re}_{D_H})^{-1/8}$
- 水力直径L：对于圆管取直径，对于其它形状取等效水力直径确定；
- 湍动耗散率 $\epsilon = C_\mu^{3/4}\frac{k^{3/2}}{\ell}$ ，Cμ＝0.09
- 湍动能 $k = \frac{3}{2}(u_{\rm avg} I)^2$
- 比耗散率 $\omega = \frac{k^{1/2}}{C_\mu^{1/4}\ell}$
- 式中，l 为湍流长度尺度，l＝0.07L

FLUENT中的材料

- 包括：密度或者分子量，粘度，热容，热传导率，质量扩散系数，标准焓，分子运动论参数。
- 定义方式：
  - 1）通过读入Case文件来定义材料。
  - 2）可以自己定义新的材料。
  - 3）利用UDF来修改材料属性。

FLUENT中监视参数设置

- MONITOR
- 监视残差（同时可以修改收敛的判据）
- 监视点、线、面上的变量值



FLUENT中的边界条件

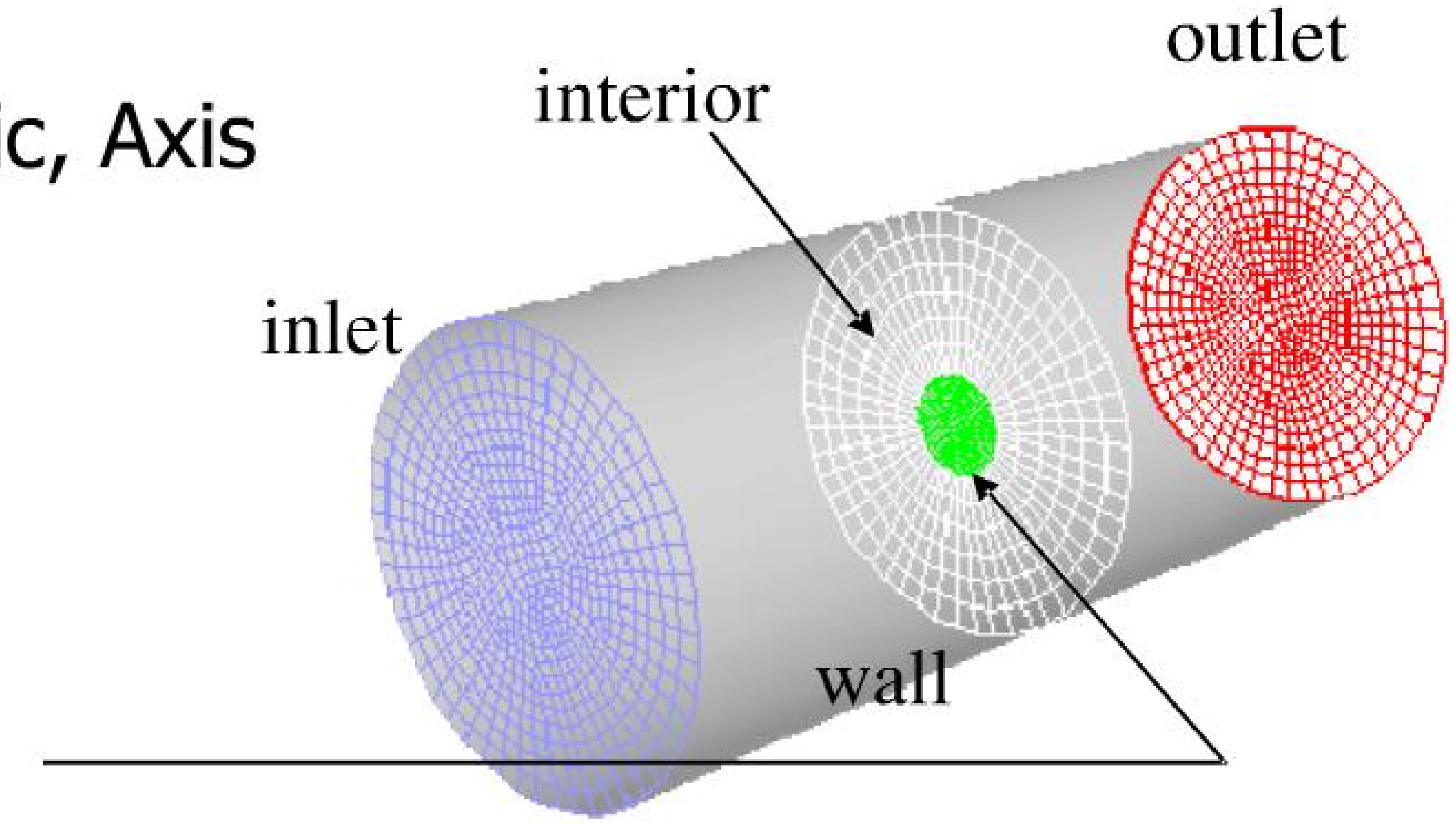
- 为了获得物理问题（各种微分方程）的唯一解，必须对计算域边界设定各种参数值.
  - 如各种通量（热通量、质量通量）、运动状况等.
- 边界条件内容:
  - 定义边界条件的位置信息（如进口、固体壁面、对称位置面）
  - 确定边界上的各种参数信息
- 边界条件的具体内容和计算中采用的物理模型、边界条件的类型密切相关.
- 必须仔细确定边界条件的参数
  - 直接影响了求解过程和所得到的结果.

FLUENT中的边界条件设置原则

- 设定在流场的进、出口
  - ——有利于收敛
- 在垂直边界上不应该存在很大的参数梯度
  - ——会导致不同的计算结果
- 减少边界附近的网格扭曲度
  - ——导致早期计算误差过大

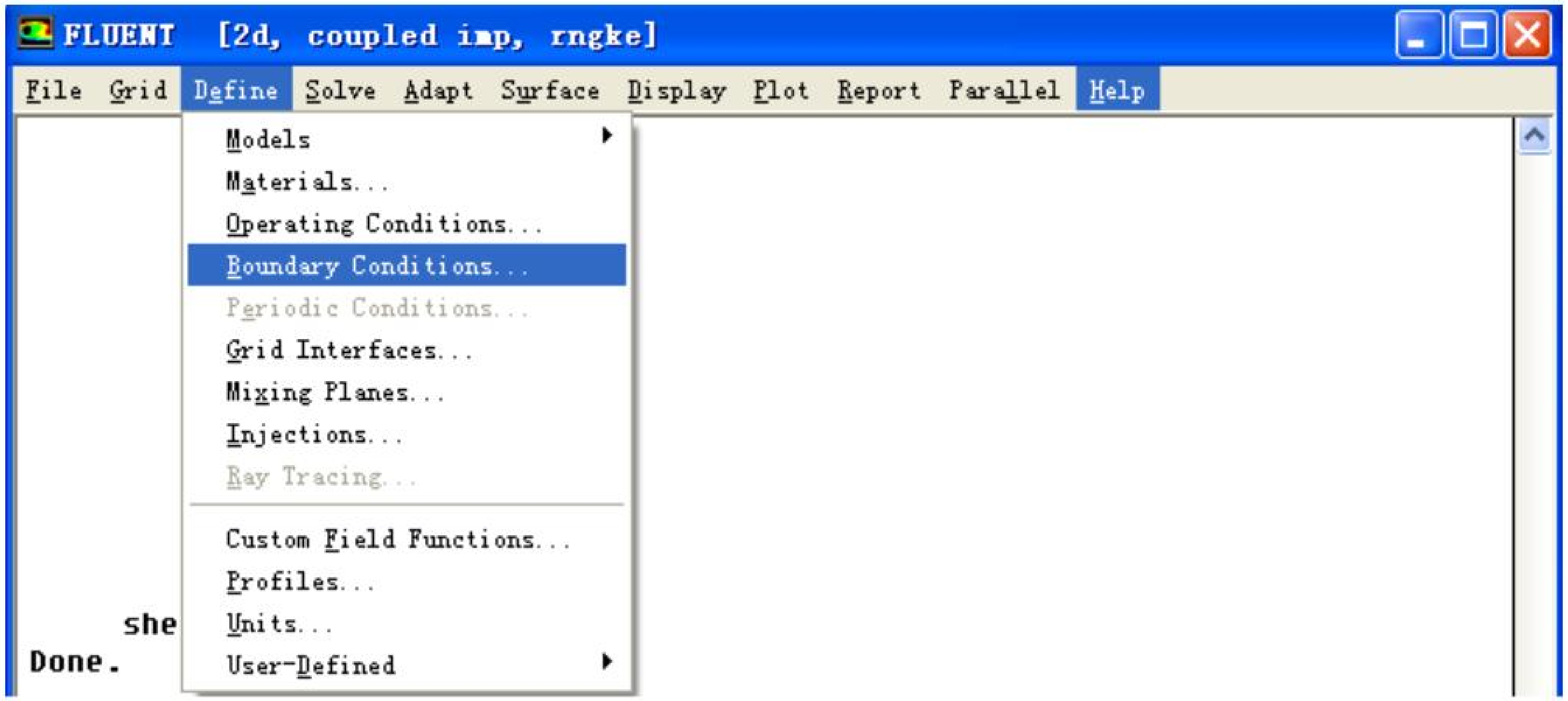
FLUENT中的基本边界类型

- 外部面
  - 一般：Pressure inlet, Pressure outlet
  - 不可压：Velocity inlet, Outflow
  - 可压：Mass flow inlet, Pressure far-field
  - 特殊：Inlet vent, outlet vent, intake fan, exhaust fan
  - 其它：Wall, Symmetry, Periodic, Axis
- 单元、区域
  - Fluid and Solid
- 相交面
  - Fan, Interior, Porous Jump, Radiator, Walls



FLUENT中边界条件的定义

- 在Fluent中定义边界条件的具体值
  - 各种边界条件的参数
  - 可以重新定义边界类型

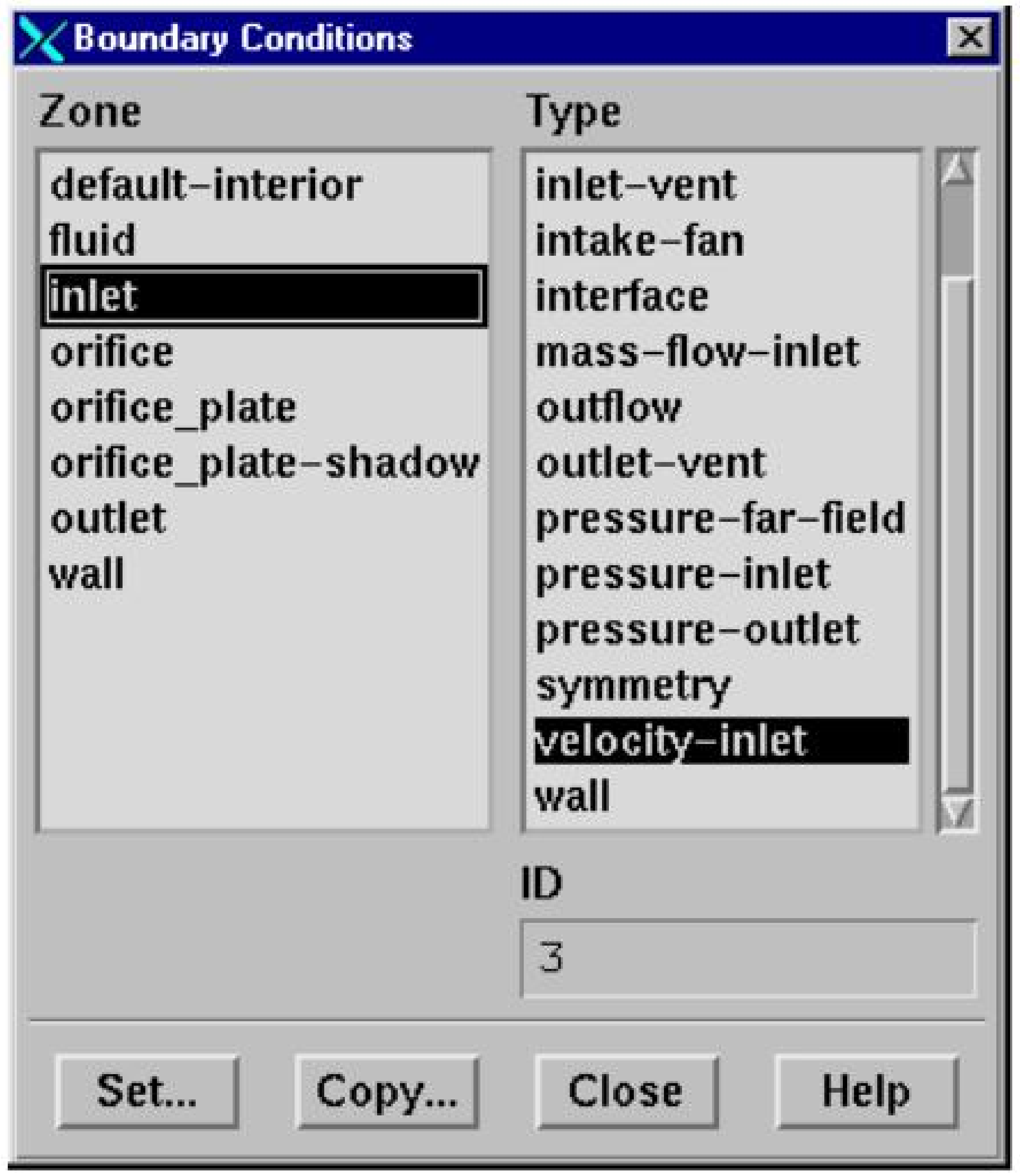


重新定义边界条件

- 一般边界条件在预处理软件中定义.
- 可以在Fluent中更改:

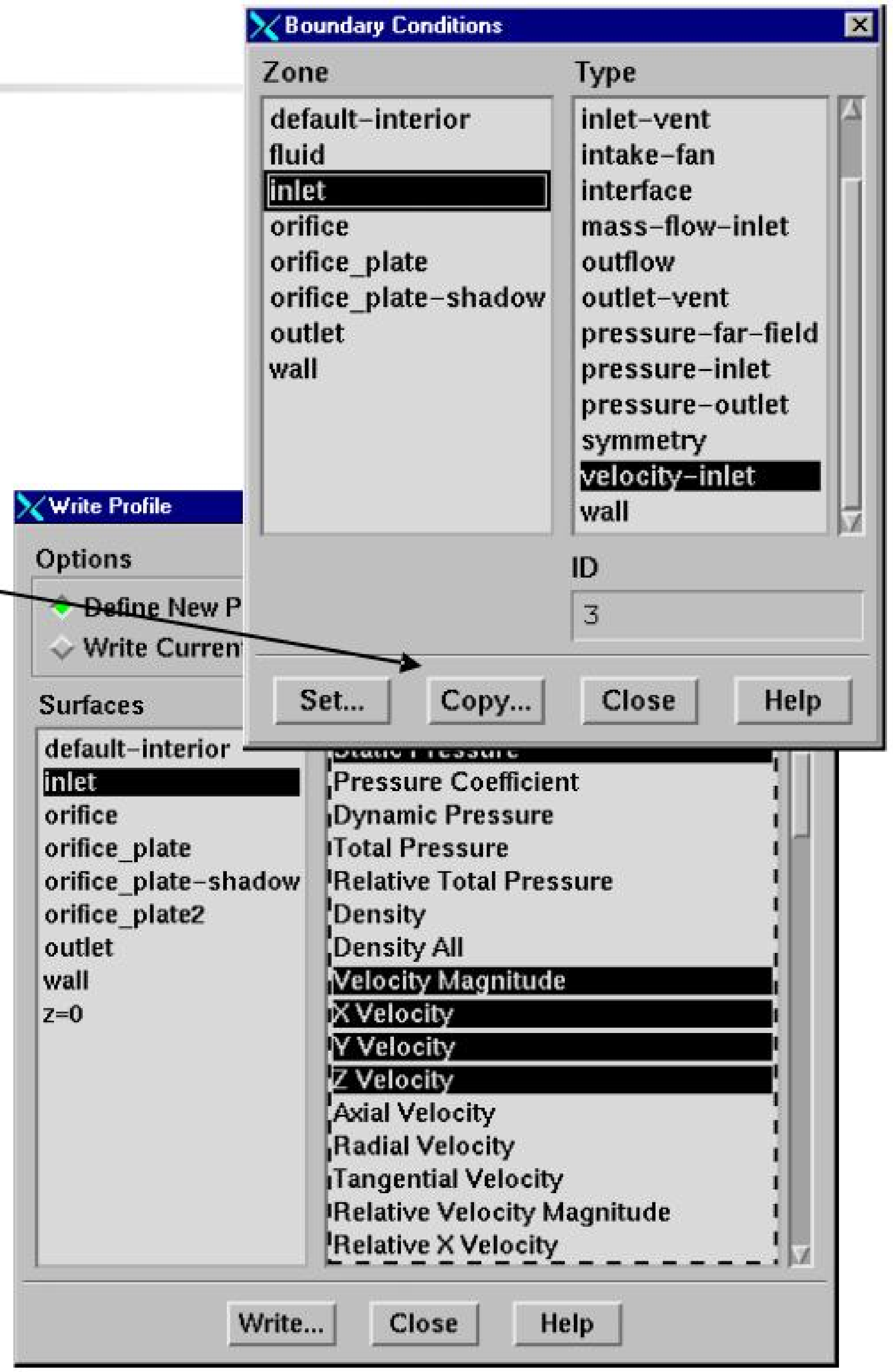
  Define → Boundary Conditions...

  - 选择要更改的几何体
  - 从Type中选择新的类型.

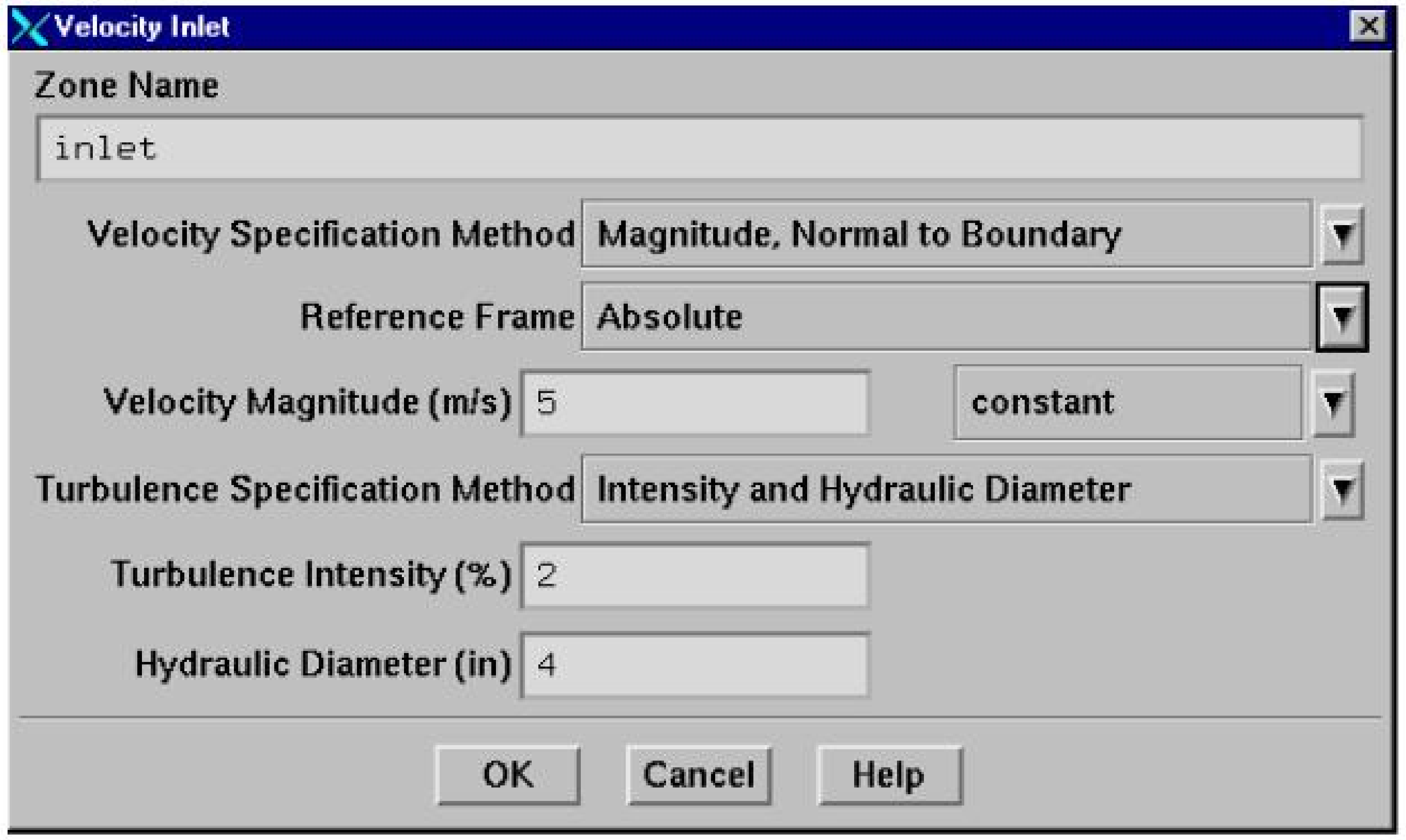


给定边界条件参数

- 在 BC panels中直接赋值.
  - 给选定的边界设定:
    - 从Zone菜单中选择边界.
    - 点击Set按钮
  - 利用Copy按钮可以复制边界条件.
- 边界条件的内容可以存盘，也可以读入.
  - file → write-bc and file → read
- 利用 UDF and Profiles可以 定义复杂的边界条件。



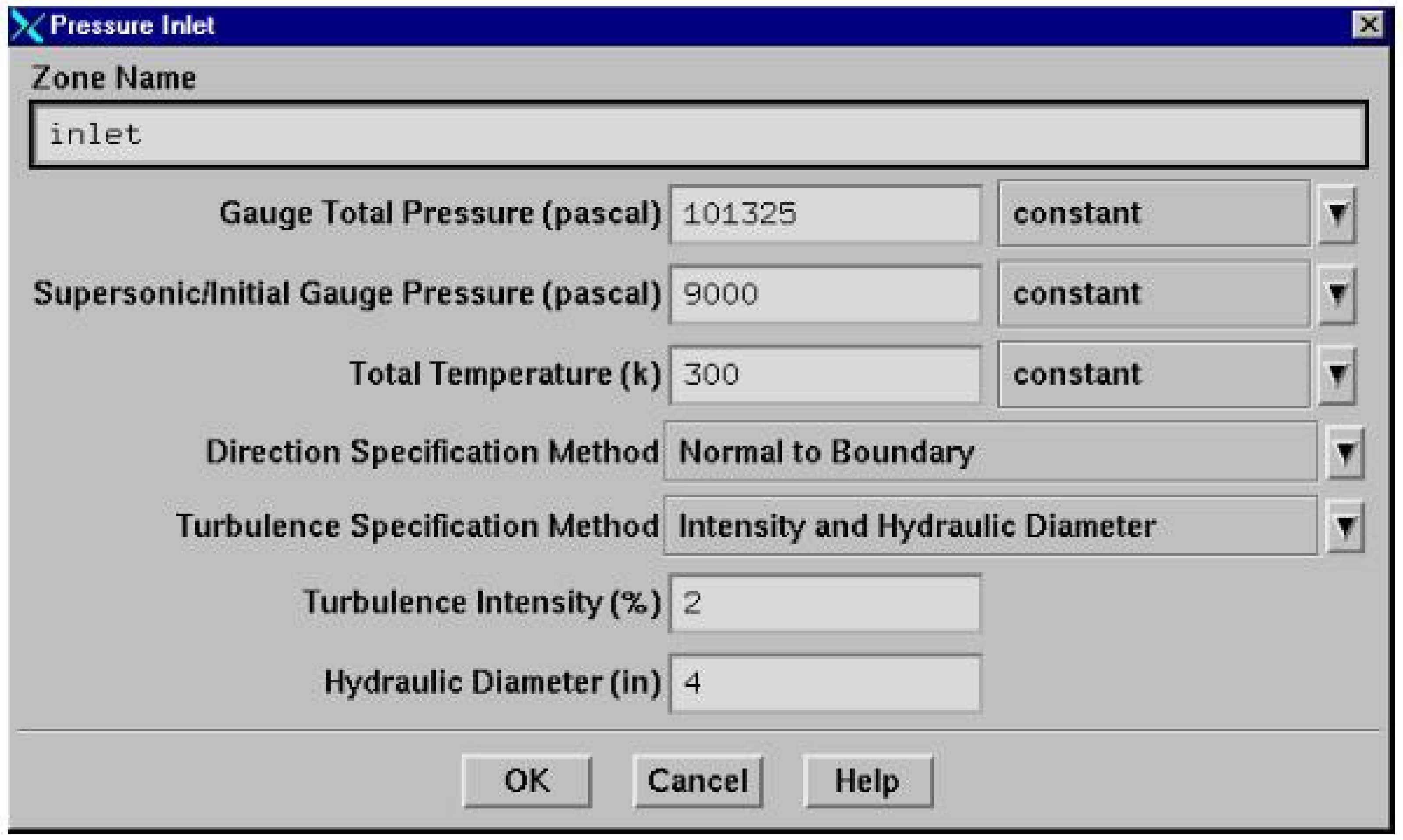
Velocity Inlet



- 定义类型:
  - Magnitude, Normal to Boundary
  - Components
  - Magnitude and Direction
- 默认值为均匀流动
- 适用于 incompressible flows.
  - 用于 compressible flows 将有可能导致非物理解.
- 速度设定为负值时，可以用来表示出口.
  - 但是必须要保证流量平衡.

Pressure Inlet (1)

- 参数确定:
  - Total *Gauge* Pressure
    - 驱使流体运动的能量.
  - Static *Gauge* Pressure
    - 超音速流动时静压;
    - 亚音速时忽略
    - 从该边界初始化时有用
  - Total Temperature
    - 对于不可压流作为静温.
  - Inlet Flow Direction



Compressible flows:

$$p_{total,abs} = p_{static,abs}\left(1+\frac{k-1}{2}M^2\right)^{k/(k-1)}$$

$$T_{total} = T_{static}\left(1+\frac{k-1}{2}M^2\right)$$

Incompressible flows: $p_{total} = p_{static} + \frac{1}{2}\rho v^2$

Pressure Inlet (2)

- 注意的是 *Gauge* pressure 必须给定.
  - Operating pressure 定义： Define → Operating Conditions

- 同时适用 compressible 和 incompressible flows.
  - Fluent 计算时采用 static pressure and velocity
  - 通过压力面的通量由内部条件和流动方向决定.

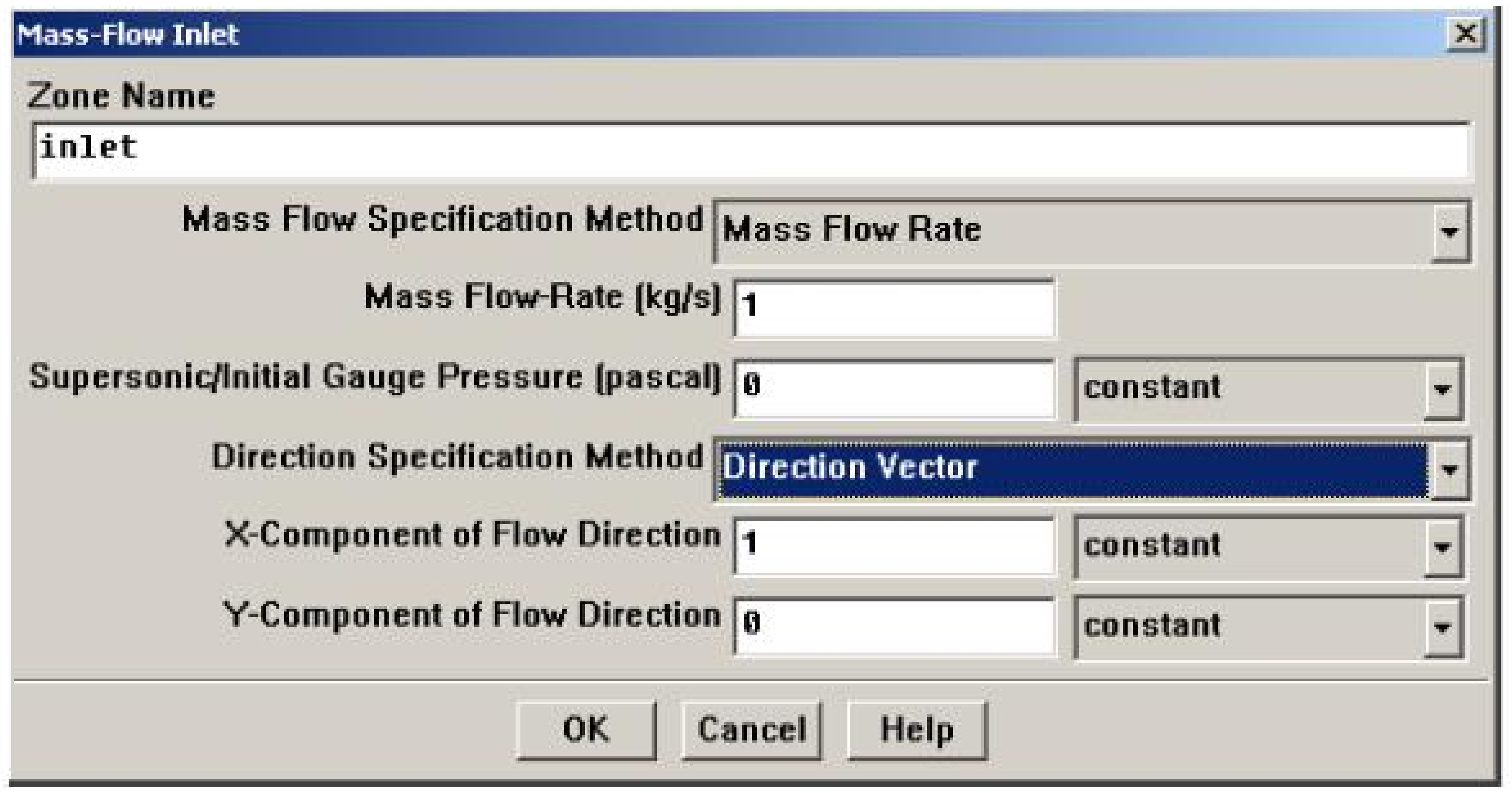
- 可以被用作模拟 “Free”面.

Pressure Inlet (3)

- 只要流动是亚声速的，FLUENT会忽略Supersonic/Initial Gauge Pressure，它是由指定的驻点值来计算的。如果打算使用压力入口边界条件来初始化解域，Supersonic/Initial Gauge Pressure是与计算初始值的指定驻点压力相联系的，计算初始值的方法有各向同性关系式（对于可压流）或者贝努利方程（对于不可压流）。
- 因此，对于压声速入口，它是在关于入口马赫数（可压流）或者入口速度（不可压流）合理的估计之上设定的。

Mass Flow Inlet

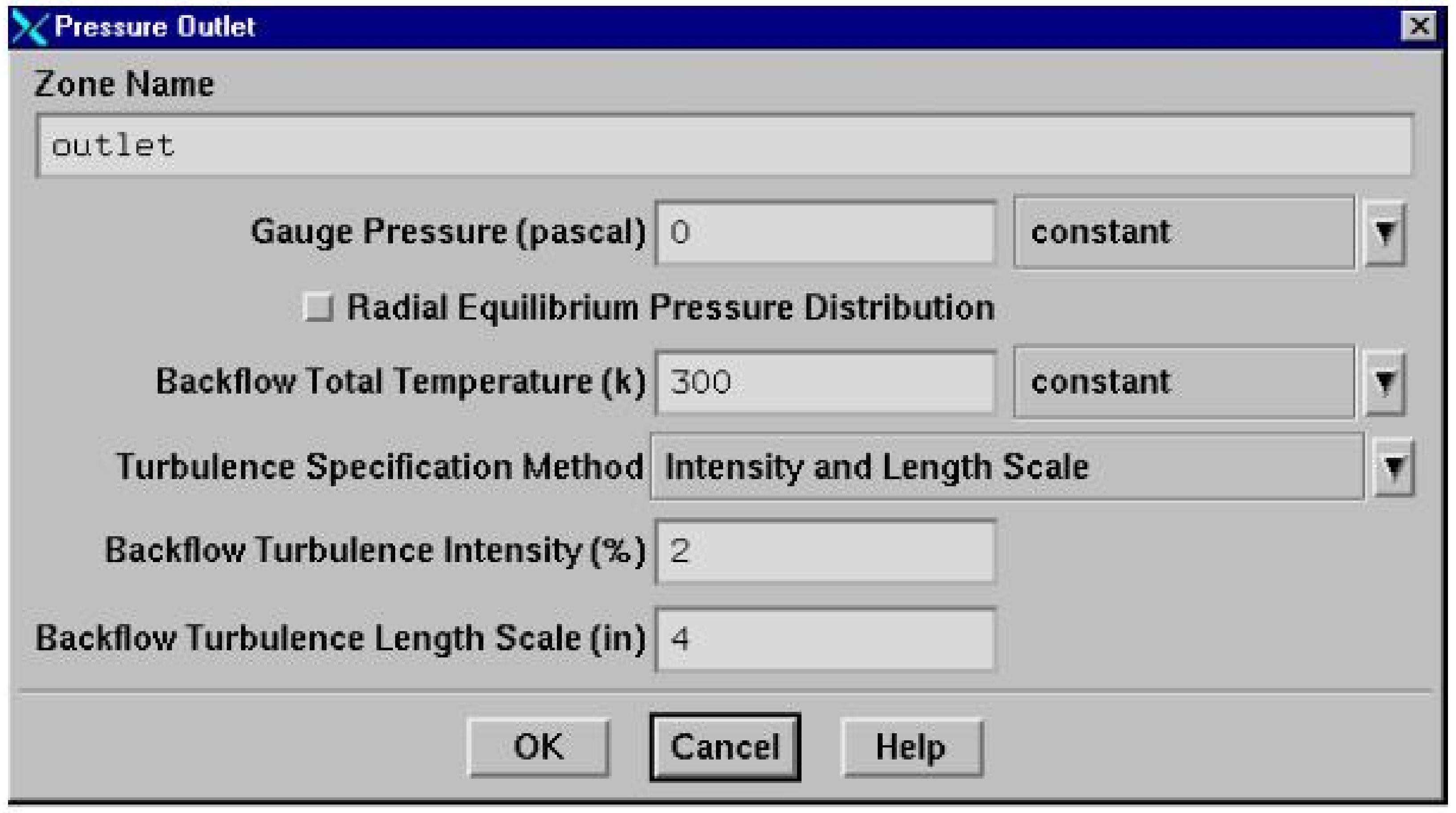
- 参数确定:
  - (a) Mass Flow Rate or (b) Mass Flux
    - (a) 给定恒定的流量
    - (b) 利用 profiles/UDF定义
  - Static *Gauge* Pressure
    - 超音速有效
    - 该边界初始化有效.
  - Total Temperature
    - 对于不可压流动为静温.
  - Inlet Flow Direction



- 一般用于 compressible; 也可用于 incompressible flows.
  - Total pressure 由输入变量求得.
  - 和 pressure inlet相比.收敛性差

Pressure Outlet

- 给定 static *gauge* pressure
  - 作为出口处的环境压力.
  - 可以定义径向的压力分布.



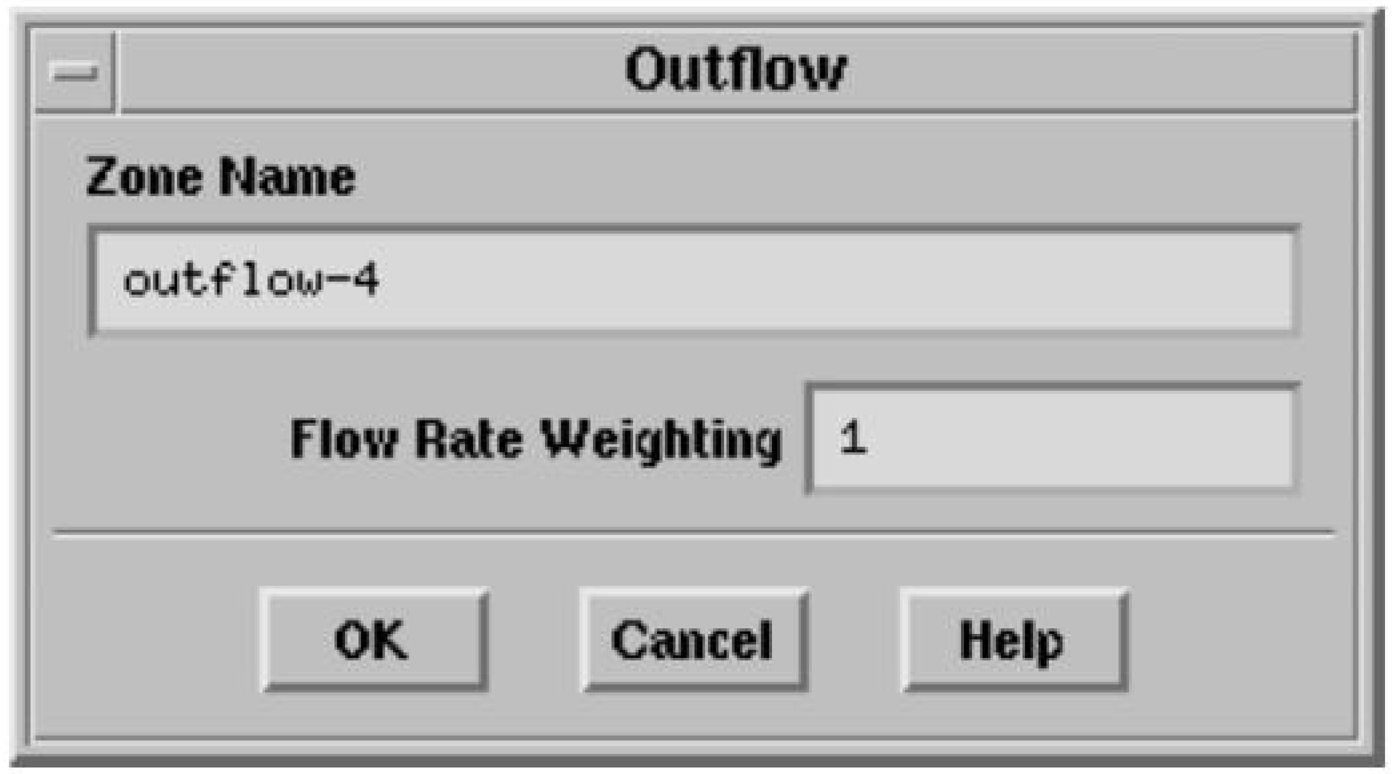
- Backflow
  - 收敛过程出现
  - 最终结果如此.
  - 方向是垂直于边界.

- 适用于 compressible 和 incompressible flows
  - 在超音速条件下，忽略所给定的压力值.

- 可以被用来模拟自由流.

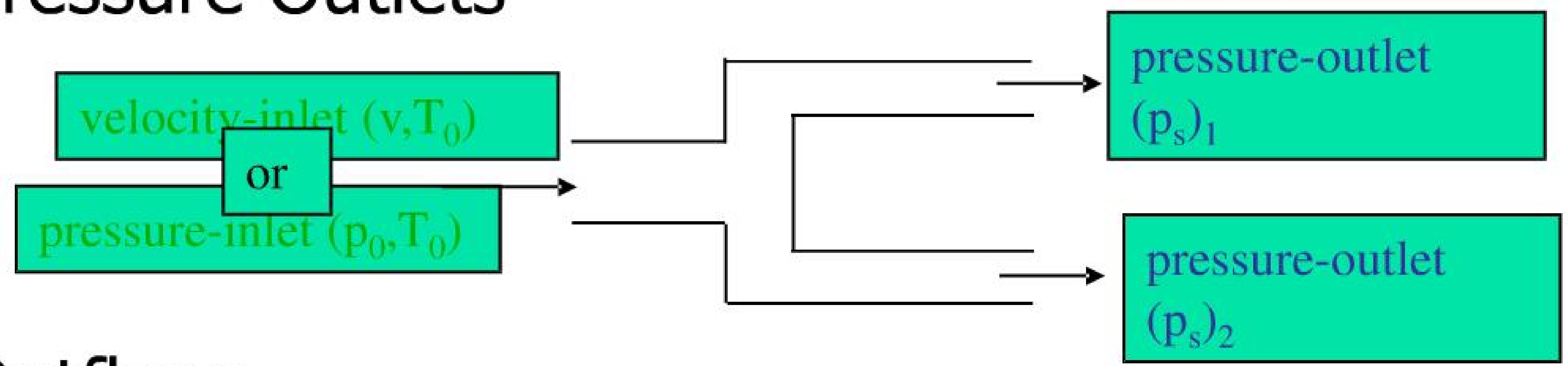
Outflow

- 不需指定任何速度和压力信息.
  - 由内部区域来传递信息.
  - 边界上保持流量平衡.
- 在Outflow面上所有参数梯度为零
  - 近似于充分发展流
- 适用于 incompressible flows.
  - 不能和 Pressure Inlet合用; 入口只能是 velocity inlet.
  - 不能用来模拟密度随时间变化的问题.
- 当存在回流时，很难收敛
  - 不能模拟最终结果存在回流的物理问题.

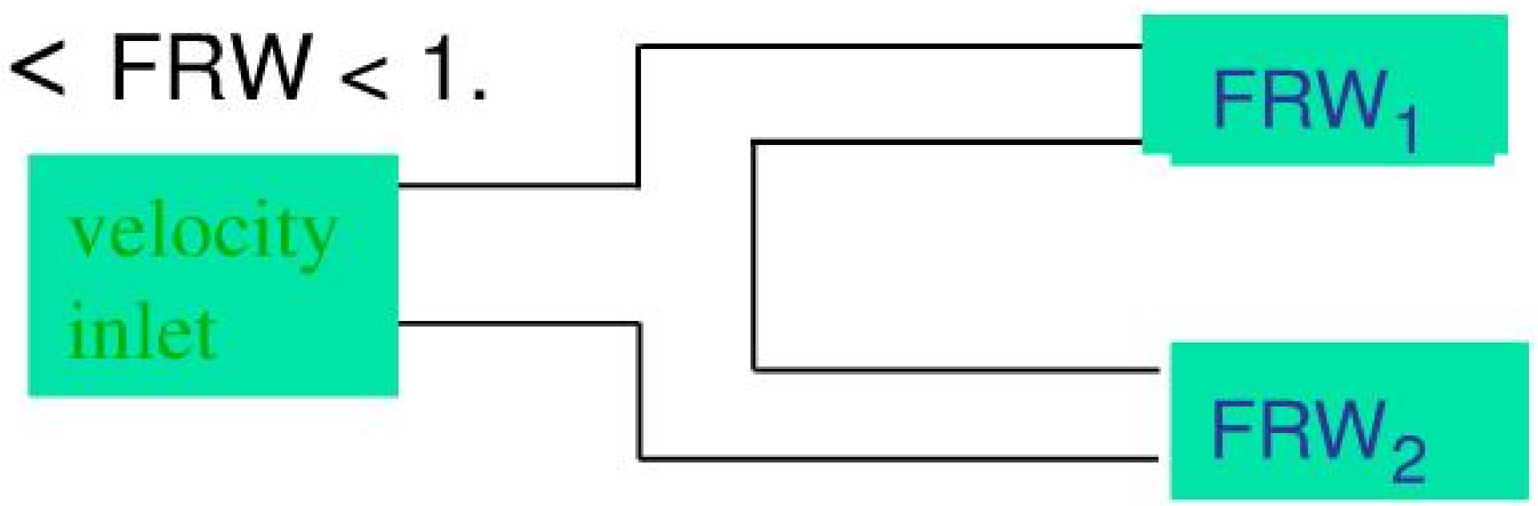


多通道出口

- 可以利用 Pressure Outlet 和 Outflow boundaries.
  - Pressure Outlets



  - Outflow:
    - 出口流量定义如下:
      - $m_i = FRW_i / \Sigma FRW_i$ where $0 < FRW < 1$.
      - FRW 为 1 表示均匀分布

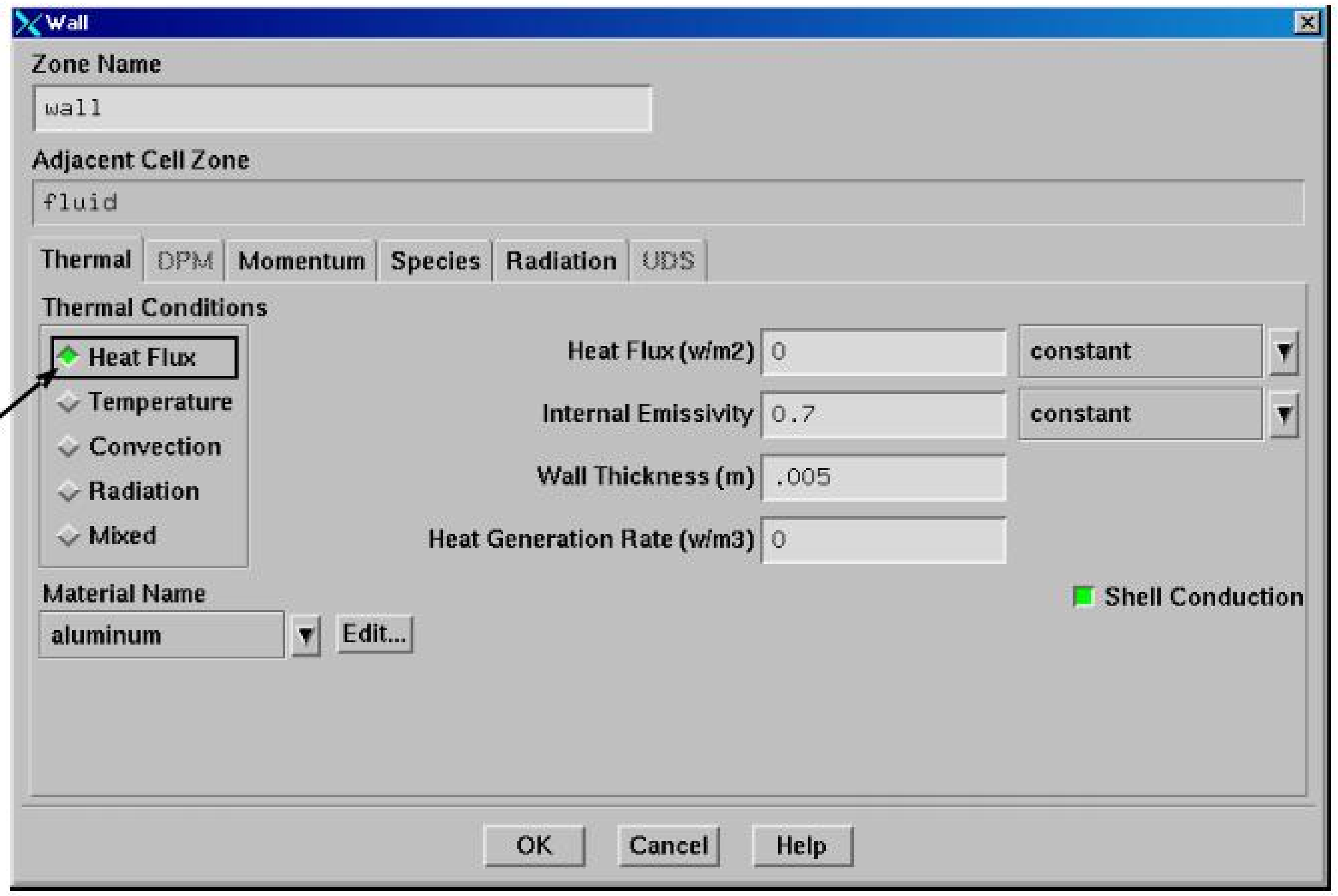


其它的边界条件

- Pressure Far Field
  - 模拟 ideal gas law下的流动.
  - 通常给定 free-stream Mach number 和静态参数 .
- Exhaust Fan/Outlet Vent
  - 给定压力损失系数（压力降）以及环境参数
- Inlet Vent/Intake Fan
  - 模拟风扇运动.
  - 给定压力损失系数（压力降）以及环境参数

Wall Boundaries

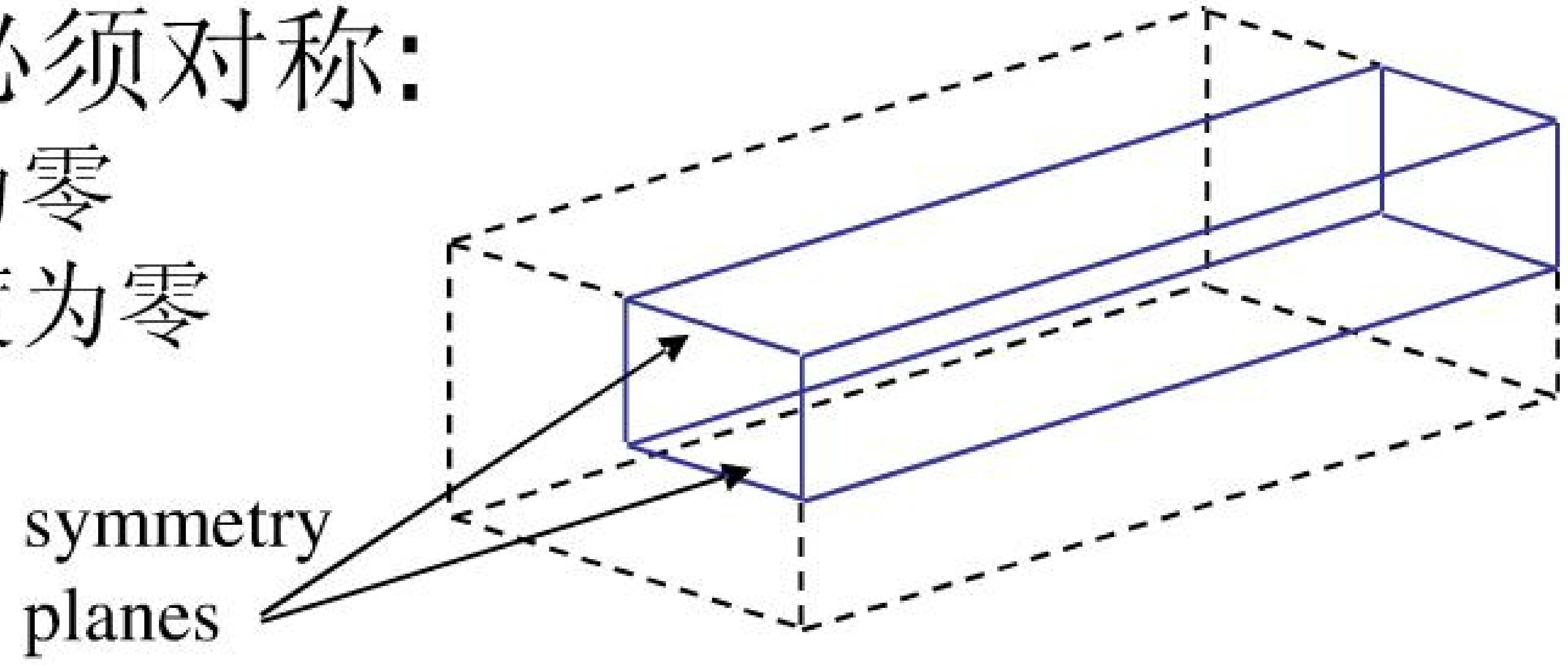
- 速度：无滑移
  - 切向速度和固壁面速度相等.
  - 法向速度为零
  - 可以定义壁面剪切力.
- 热边界:
  - 几种不同的条件
  - 包括定义壁面厚度.
- 定义运动的壁面.



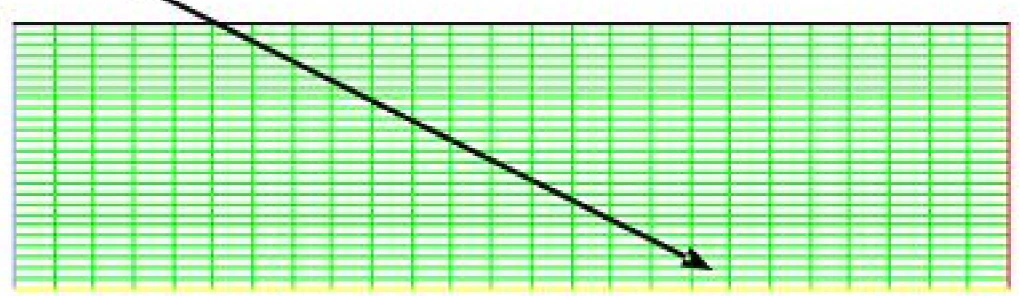
Symmetry and Axis Boundaries

- Symmetry Boundary
  - 简化计算量.
  - 不需任何参数.
  - 计算域和几何形状必须对称:
    - 对称面上法向速度为零
    - 所有的变量法向梯度为零



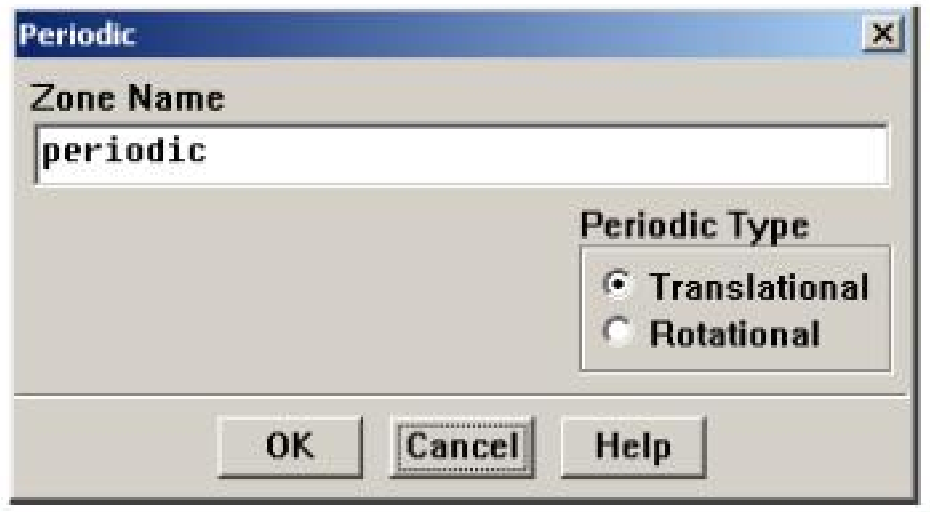


- Axis Boundary
  - 模拟二维轴对称问题.
  - 不需任何参数.

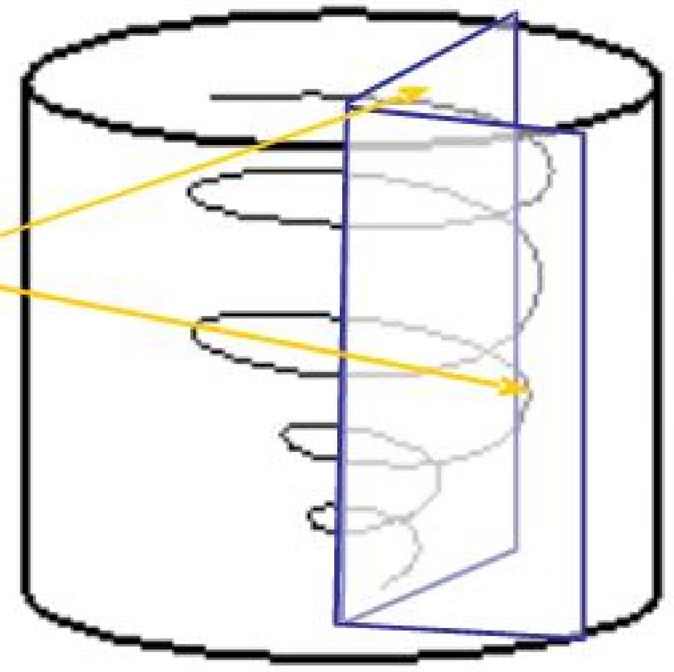


Periodic Boundaries

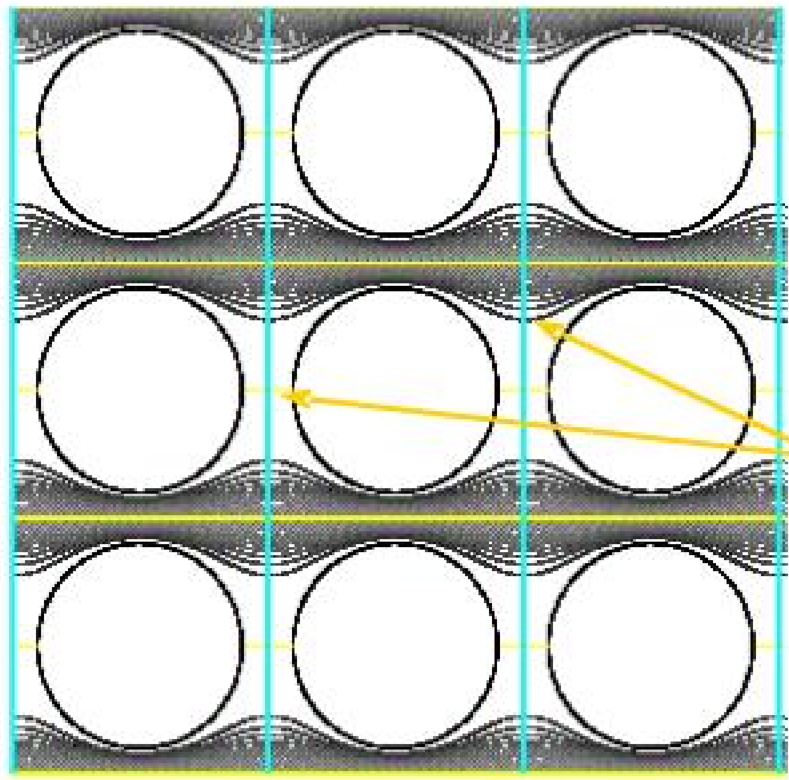
- 减小计算量.
- 计算域为周期性运动区域.
- 周期性旋转:
  - 周期面上Δp = 0.
- 周期性平动:
  - 在周期面上允许有限的Δp .
    - 模拟充分发展流.
    - 在Gambit中预先定义为 translational.



Rotationally periodic planes



flow

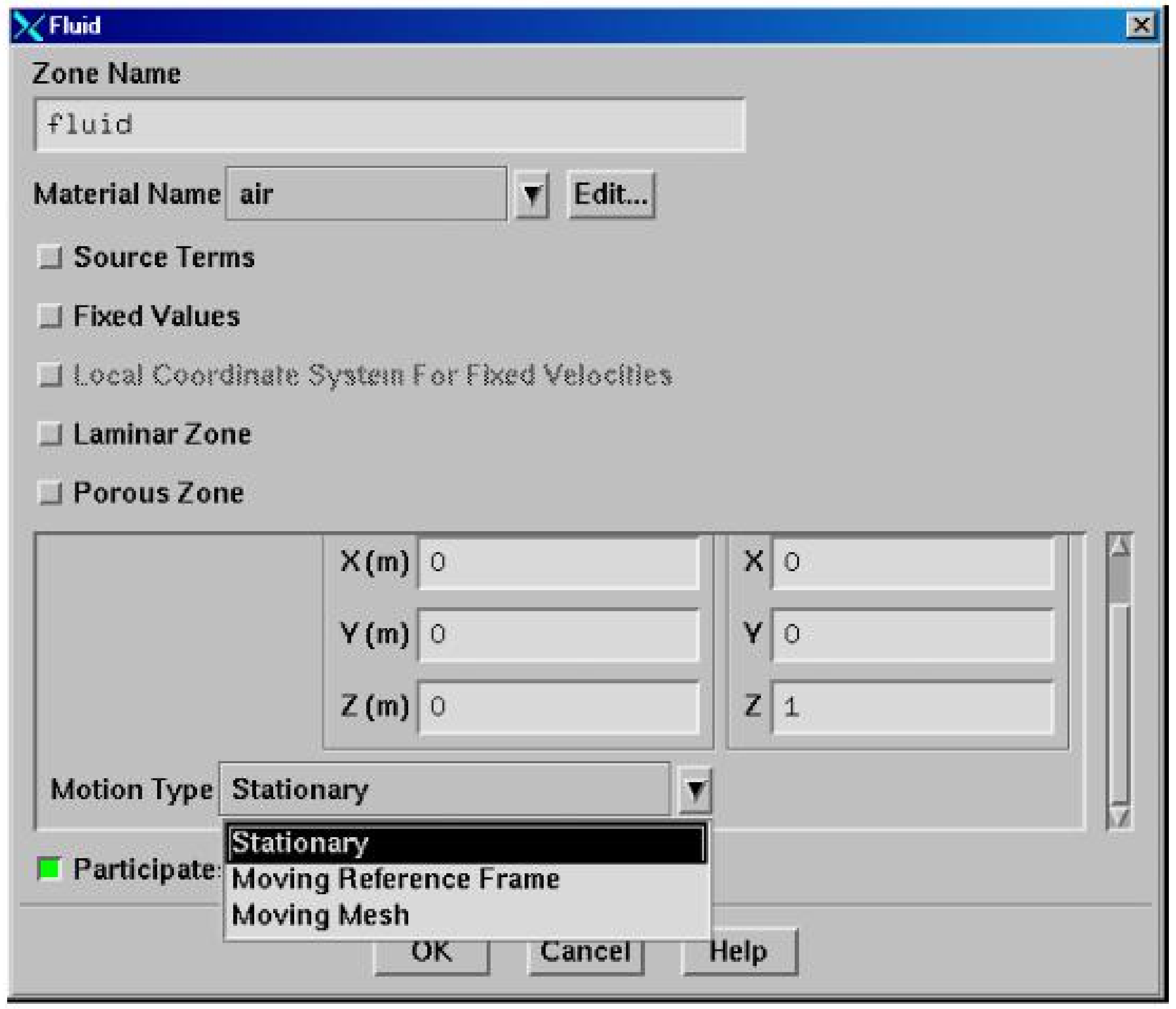


Translationally periodic planes

2D tube heat exchanger

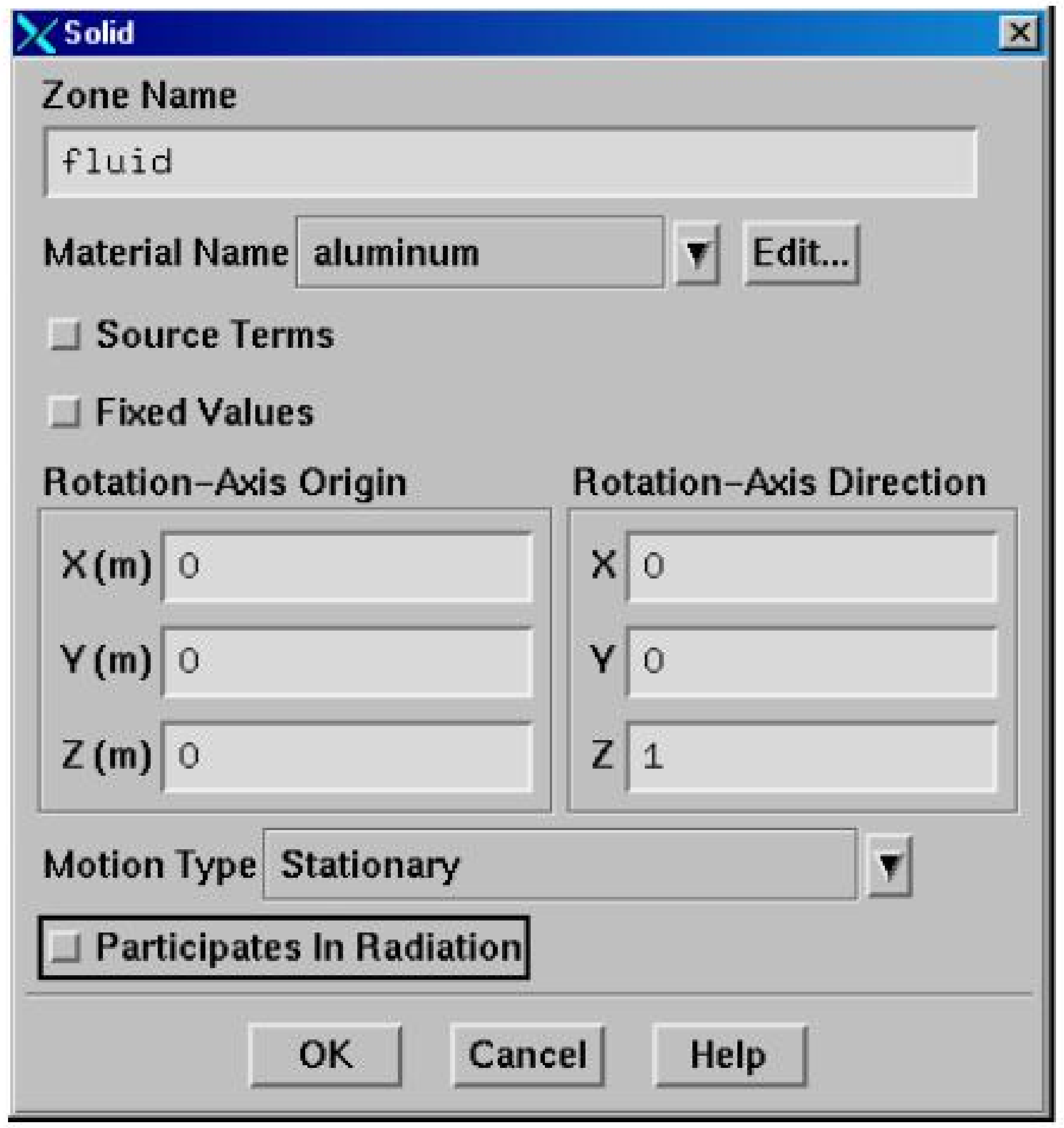
区域定义: Fluid

- Fluid zone = 求解的流体计算域.
- 确定Fluid material.
- 确定各种源项:
  - 质量、运动、能量等
- 定义为多空介质
- 定义旋转等周期性运动.
- 定义各种运动方式.



区域定义: Solid

- 只求解热平衡方程.
- 确定固体类型
- 可以定义内部的热源
- 也可定义各种形式的运动状态.



FLUENT中松弛因子的处理

- 所有变量的默认亚松弛因子都是对大多数问题的最优值，一般适合大多问题。
- 但对于残差出现不稳定或者发散，则需要减少默认的亚松弛因子（建议此时保存计算结果），特别对于一些强耦合问题，如果调整亚松弛因子以后，残差的变化出现了几个量级上的变化，则就需要停止计算回到最初保存的位置重新开始。

FLUENT中解收敛判据

- 一般观点：认为只要所有的残差达到1e-3或者1e-4就是达到收敛了。
  - 其实这个1e-3或者1e-4的收敛标准是相对而言的。在FLUENT中残差是以开始5步的平均值为基准进行比较的。如果你的初值取得好，你的迭代会很快收敛，但是你的残差却依然很高；但是当你改变初场到比较不同的值时，你的残差开始会很大，但随后却可以很快降低到很低的水平，让你看起来心情很好。其实两种情况下流场是基本相同的。
- 因此是否收敛不能简单看残差图，最重要的就是是否符合物理事实或试验结论。

FLUENT中解收敛判据

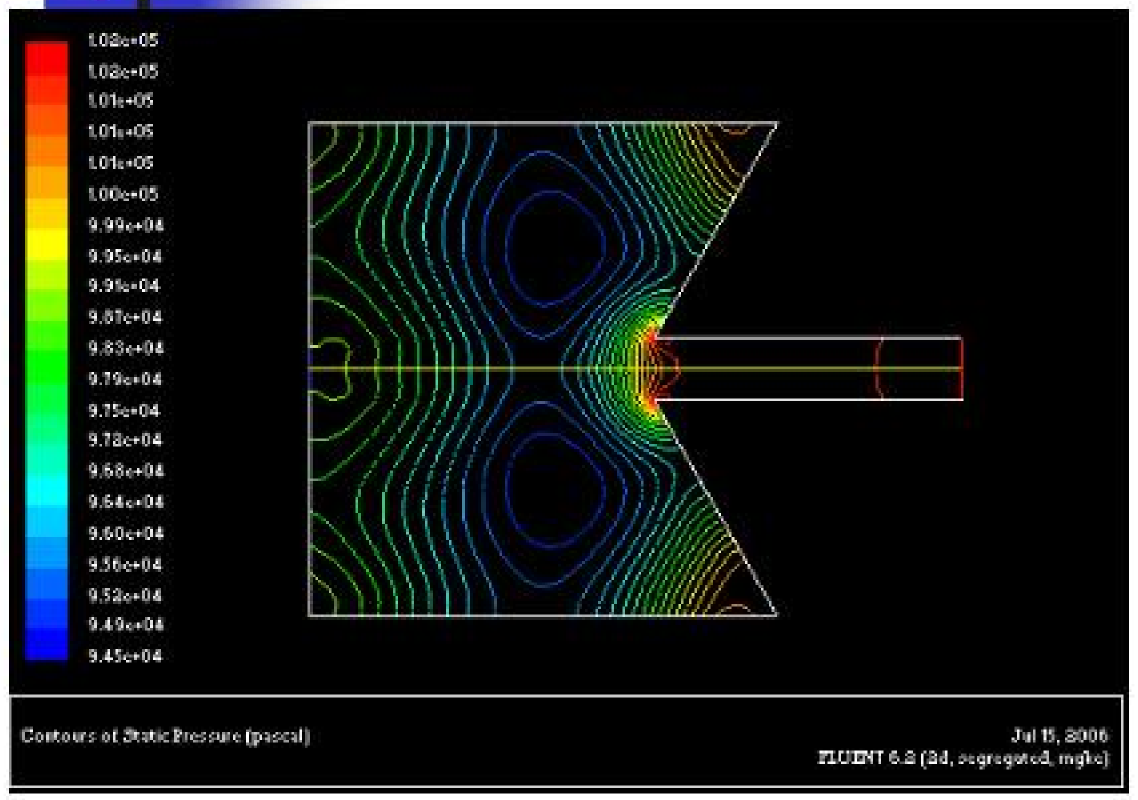
- 对于定常流动，收敛判断依据：
  - 1、观察点处的值不再随计算步骤的增加而变化；
  - 2、各个参数的残差随计算步数的增加而降低，最后趋于平缓；另一种残差判别方法：总残差降低4～6个量级，注意这里是量级，需要对残差进行归一化处理，然后求对数就可以了。
  - 3、要满足守恒定律。

FLUENT中解收敛判据

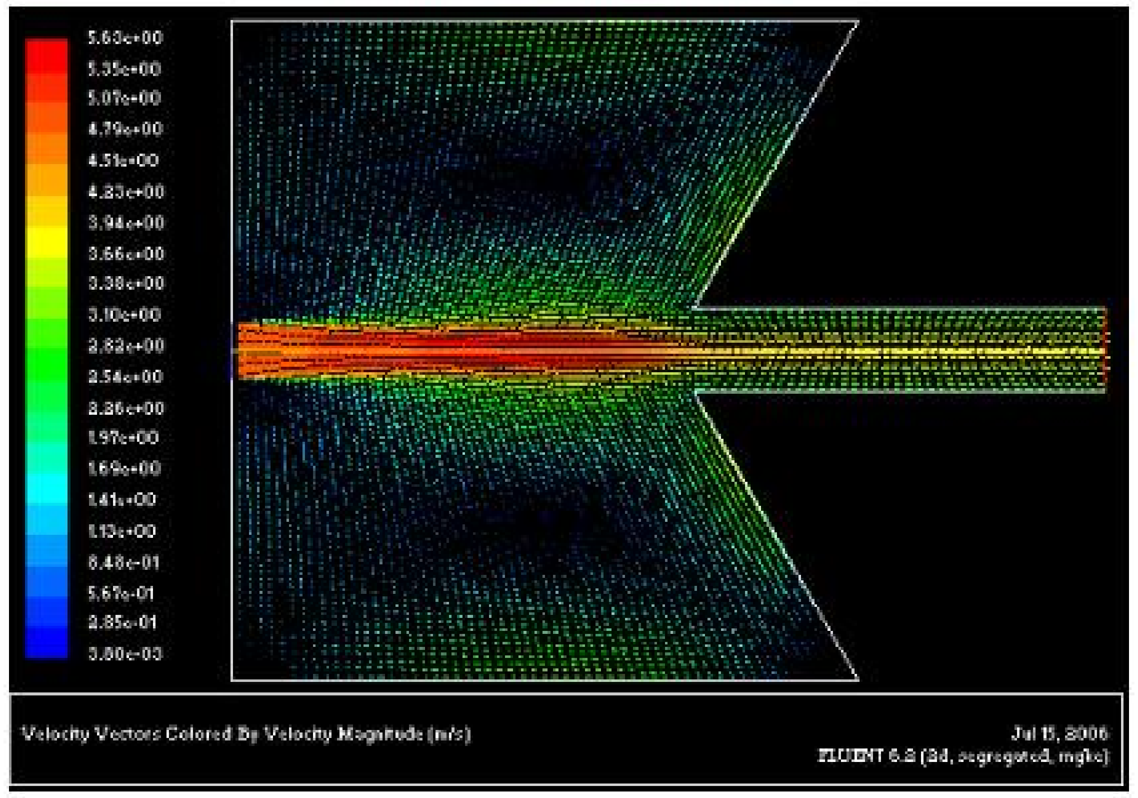
- 对于不定常流动
  - 对于非定常流动其收敛的判断标准很难具体定义，经验性很强。由于其残差是振荡的，这是解的振荡造成的，而且越复杂的流动其解的振荡越严重。
- 收敛了，但是解正确不正确还未必，跟很多因素，还需要跟实验数据做对比才有发言权。

FLUENT后处理

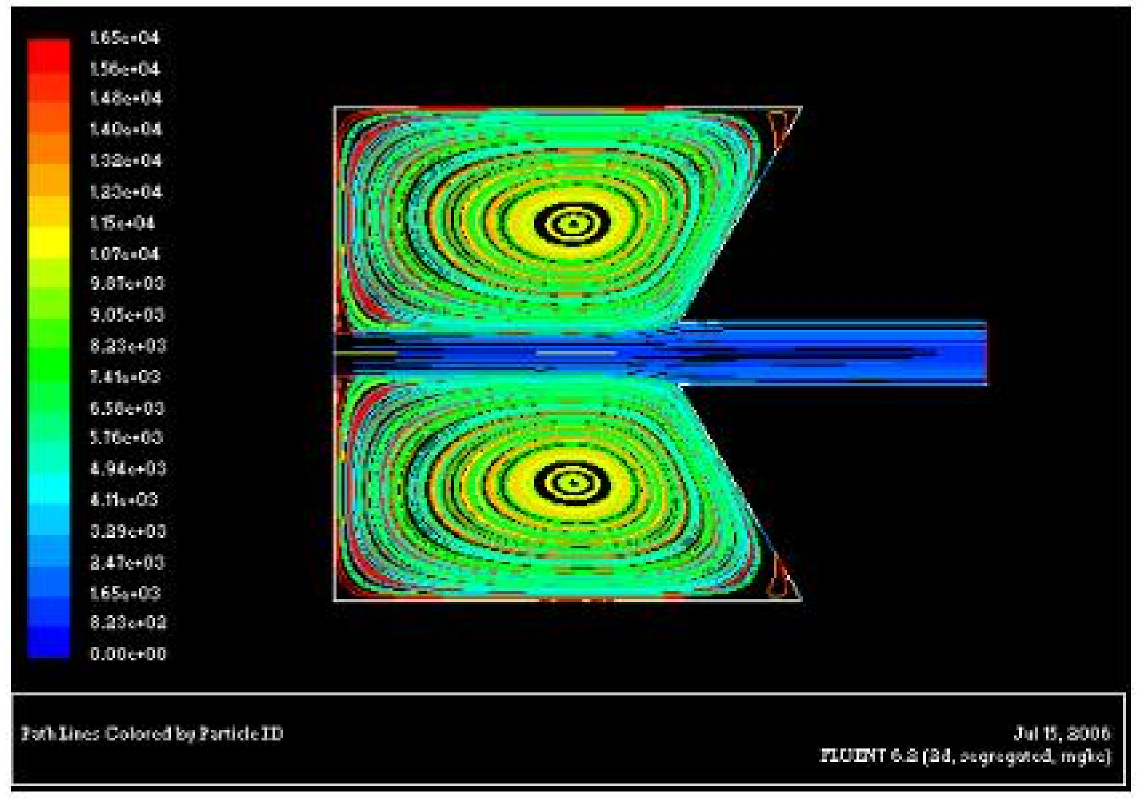
FLUENT中图像处理



等值线图



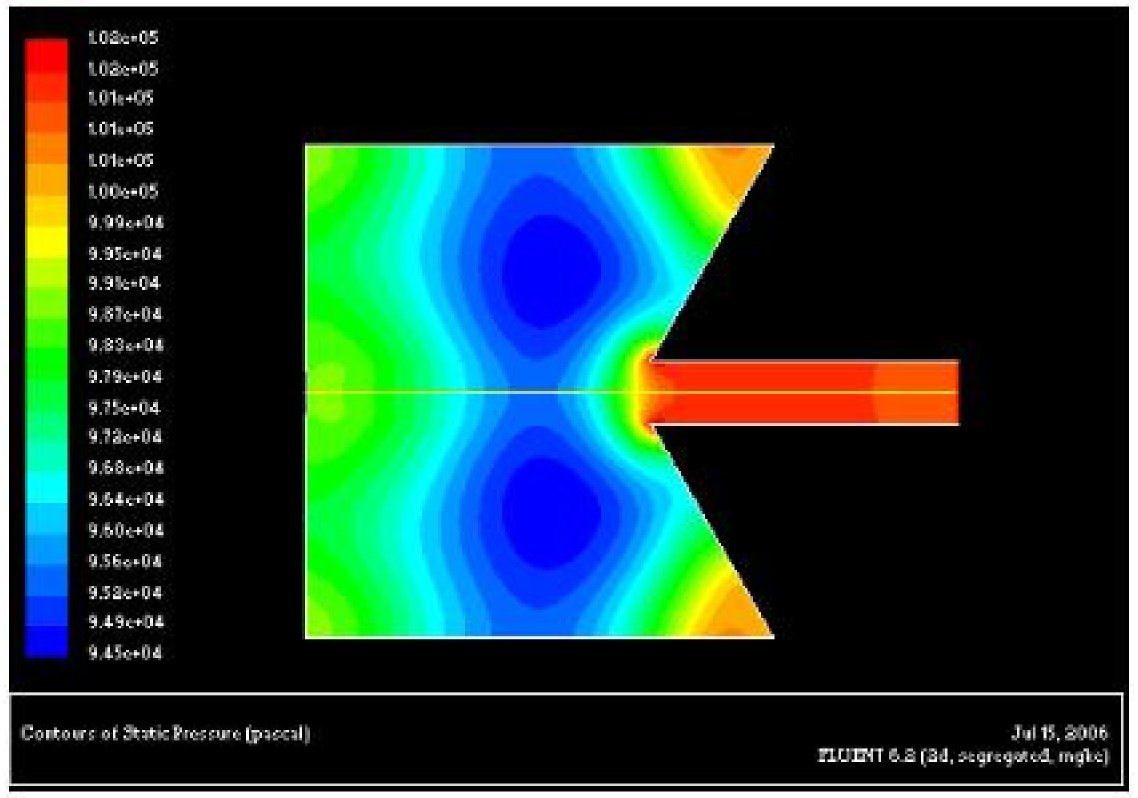
矢量图



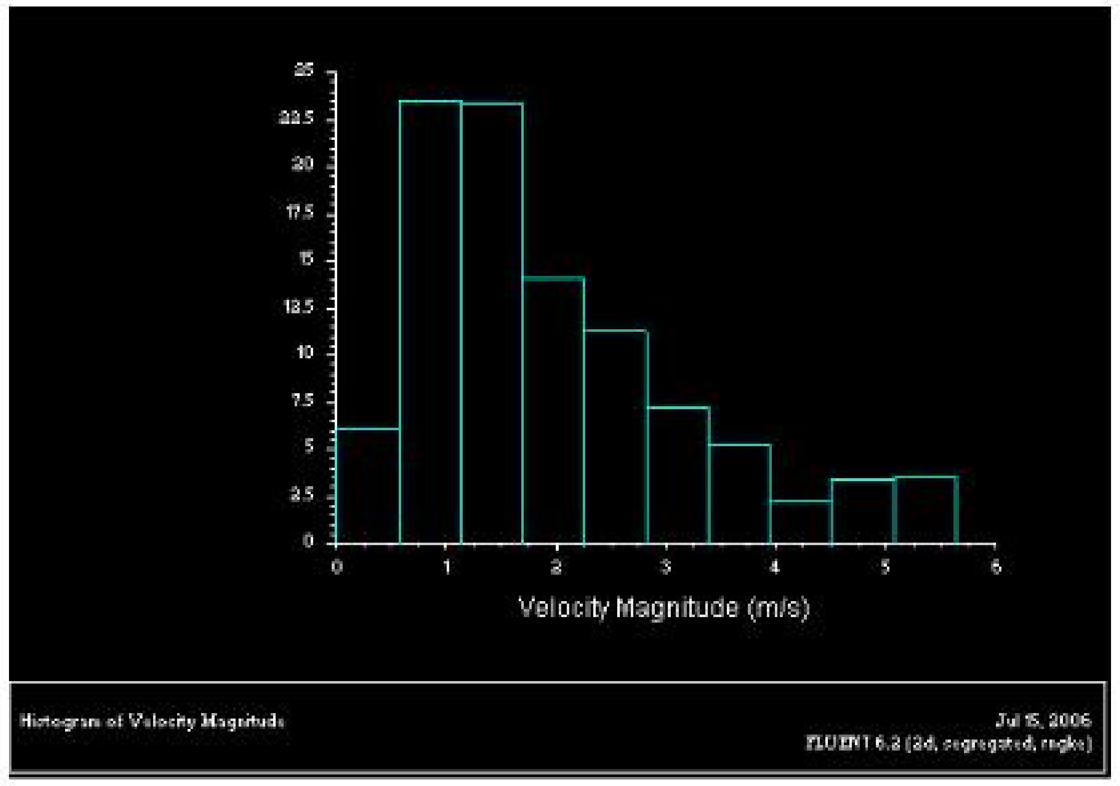
流线图

- 图像处理：
- 等值线图：在所指定表面上通过若干个点的连线，在这条线上的变量为定值。
- 矢量图：直接给出二维或三维空间里矢量的大小和方向。
- 流线图：是用不同颜色线条表示质点运动轨迹，将计算域内无质量粒子的流动情况可视化。

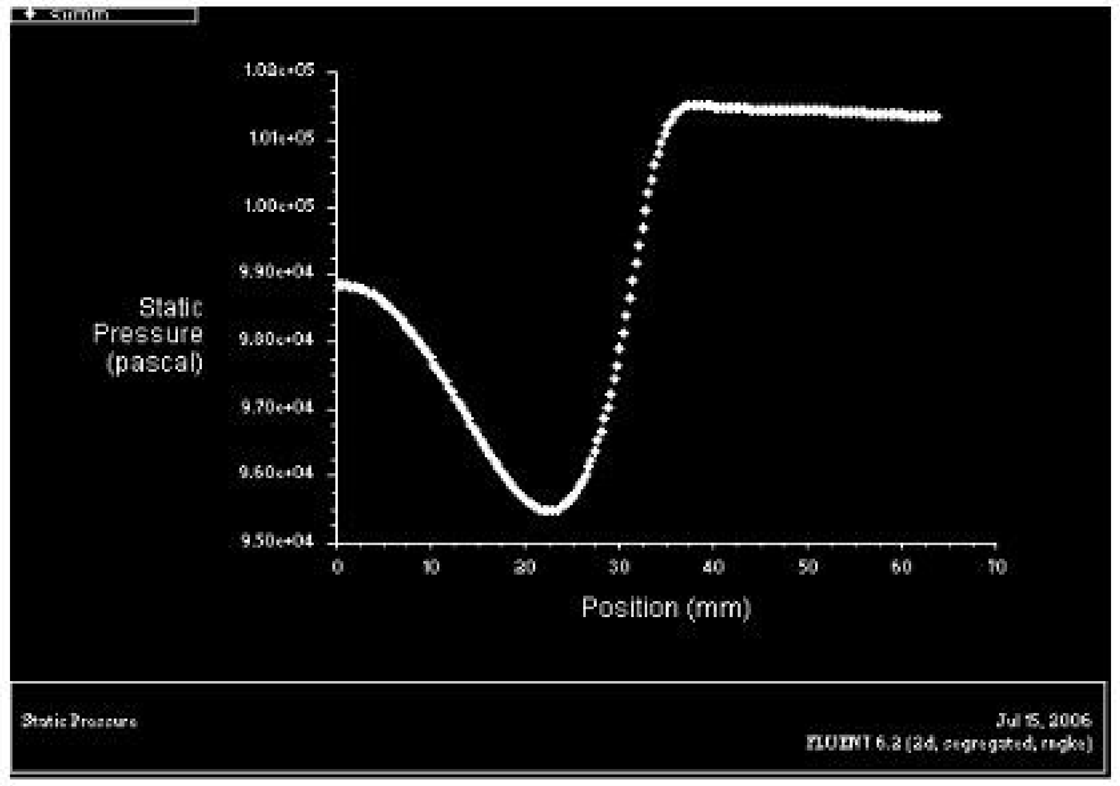
FLUENT中图像处理



云图



直方图



X-Y散点图

- 云图：以不同颜色团来表示变量值。
- 直方图：由数据条所组成的图形，横坐标为所希望的解的量，纵坐标为单元总数的百分比。
- X，Y散点图：由一系列离散的数据构成的线或符号列表。
- 动画

FLUENT自带的后处理

- 利用**FLUENT**提供的工具计算边界上或内部面上各种变量的积分值，可以计算的项目包括边界上的质量流量、热量流量、边界上的作用力和力矩、流场变量的平均值和质量平均值，并可以设置无量纲系数的参考值，计算几何体的投影面积、绘制集合数据和计算数据的柱状图，最后可以打印或者以文件形式保存一个包括模型参数、边界条件和求解参数设置等信息在内的简要报告。

TECPLOT的后处理

- TECPLOT是AMTEC公司推出的一个功能强大的科学绘图软件，提供了丰富的绘图格式，包括X-Y曲线图，多种格式的2D和3D面绘图，和3D体绘图格式。对FLUENT有专门的数据接口，可以直接读入.cas和.dat文件，也可以在FLUENT软件中选择输出的面和变量，然后直接输出TECPLOT格式文档。

其它方式的后处理

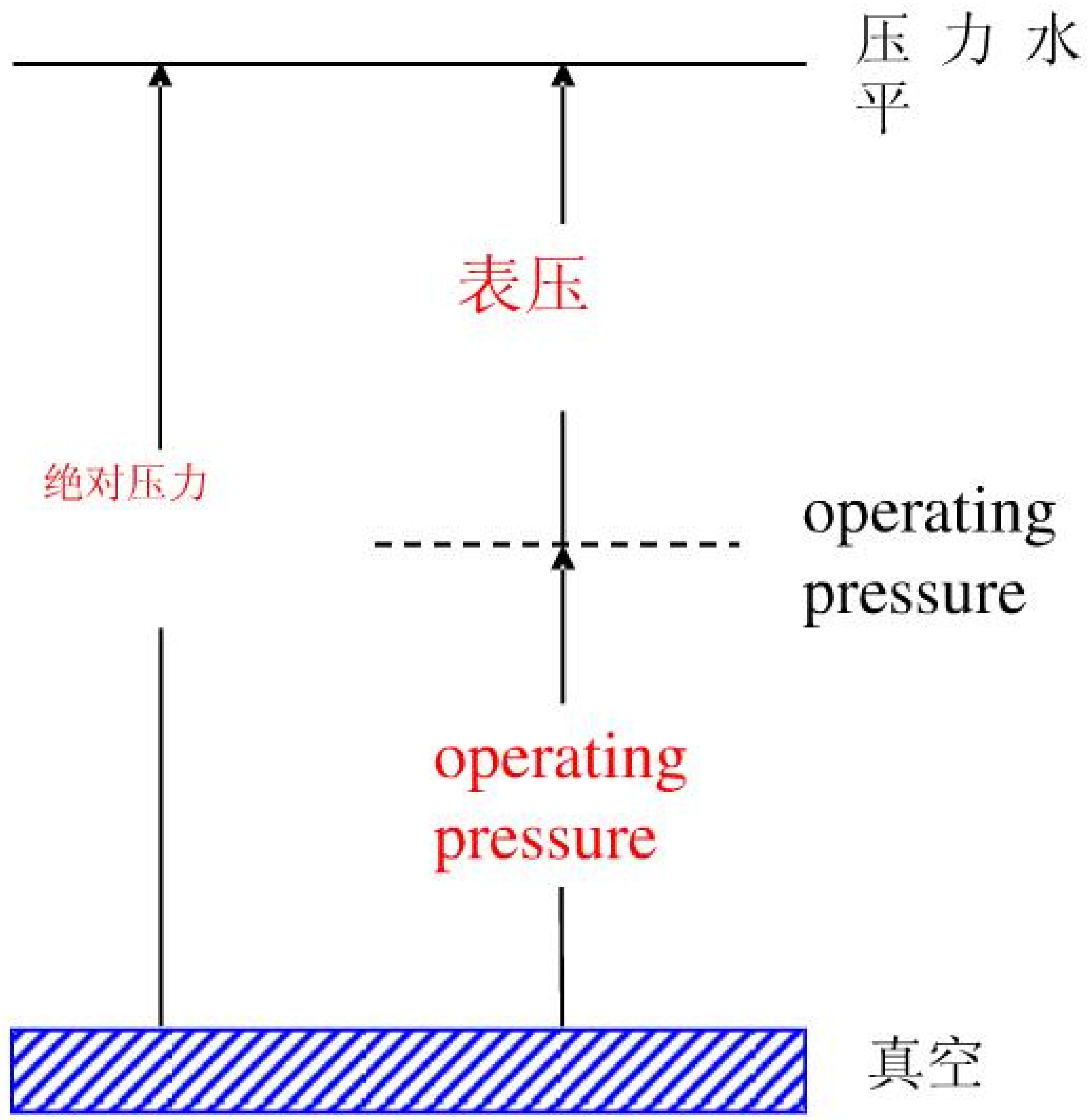
- FLUENT自带的后处理程序，绘制图像时窗体空间不能充分利用，特别是XY散点图时线条太粗，不清晰，因此可以将XY散点图的数据导出后，利用MATLAB作图分析。
- 可以利用PHOTOSHOP进行图像处理。
- 可以利用FLASH生成动画。

几个小问题

FLUENT中的压力

- FLUENT中出现如下几个压力：
- Static pressure静压 Dynamic pressure 动压 Total pressure总压 这几个压力是空气动力学的概念，它们之间的关系为:
- Total pressure= Static pressure+ Dynamic pressure
- Absolute pressure（绝对压力） operating pressure（操作压力） gauge pressure（表压）

$$p_{absolute} = p_{gauge} + p_{operating}$$



UDF

- 用户自定义函数（User－Defined Functions，即UDF）可以提高FLUENT程序的标准计算功能，它是用C语言书写。
- 我们可以用UDF来定义：
  - 边界条件
  - 源项
  - 物性定义（除了比热外）
  - 表面和体积反应速率
  - 用户自定义标量输运方程
  - 离散相模型（例如体积力，拉力，源项等）
  - 代数滑流（algebraic slip）混合物模型（滑流速度和微粒尺寸）
  - 变量初始化
  - 壁面热流量
  - 使用用户自定义标量后处理

FLUENT中多相流模拟

- FLUENT中提供的多相流模型主要有VOF模型、混合物模型和欧拉模型，这三种模型都属于用欧拉观点处理多相流的计算方法。其中VOF适用于求解分层流和需要追踪自由表面的问题。混合物模型可用于模拟存在相对运动速度的多想流问题；欧拉模型可以模拟任意数量物相的流动，但是都是采用K-e模型进行湍流计算。
- 具体设置参考：
  - FLUENT USER‘S GUIDE
  - FLUENT全功略

FLUENT中的弥散相计算

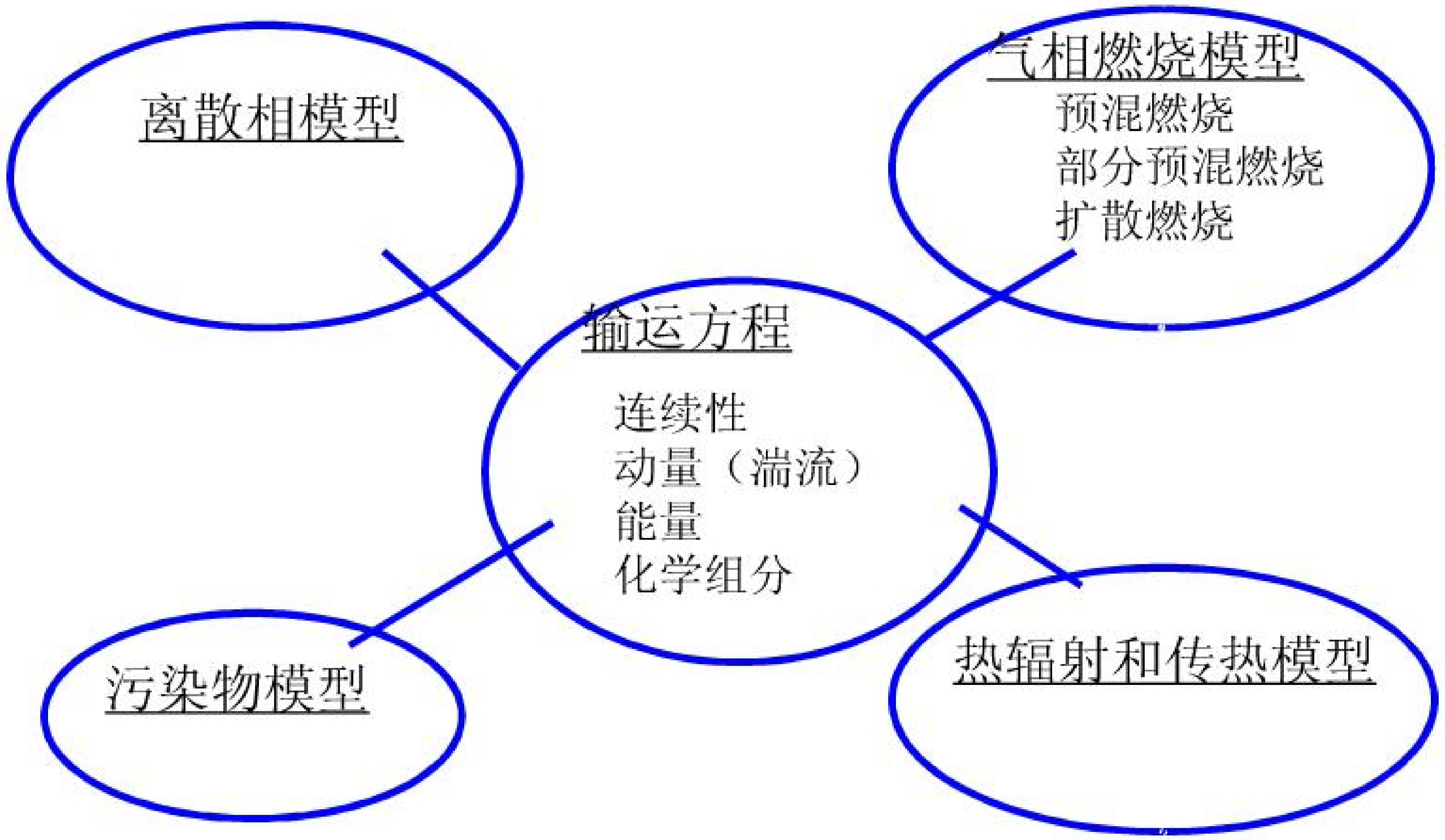
- 区别于多相流模型，FLUENT中多相流模型适合计算体积浓度大于10％的流动问题，而弥散相模型适用于体积浓度小于10％的流动问题。
- 适用性：
  - 1）适用于计算有出口和入口的流动问题；
  - 2）不能与质量流入口或压强降低条件配合使用；
  - 3）粒子与连续相之间没有化学反应；
  - 4）不能使用动网格技术。

弥散相计算策略

- 定常计算（以雾化为例）：
  - 1）求解连续相流场（气相）；
  - 2）创建弥散相射流；
  - 3）在需要的时候，用耦合的方式求解流场；
  - 4）用图形或文字报告的形式跟踪弥散相粒子。
- 非定常计算
  - 1）求解定常计算下的连续相流场
  - 2）创建弥散相射流
  - 3）初始化流场；
  - 4）通过定义迭代步数方式，控制计算推进过程，开始计算。

FLUENT中的燃烧模拟

计算过程中组元的化学性质用FLUENT提供的预处理程序prePDF进行计算处理。计算结束后计算结果保存在查阅（look-up）表格中，FLUENT在计算燃烧时则直接从查阅表格中调用数据。



不收敛时处理

- 解不收敛时可以采用下列判断程序：
  - 1 判断网格的数量和质量是否合适；
  - 2 判断边界条件是否正确；
  - 3 如果网格和边界条件正确，则调整松弛因子，但可能造成伪收敛，需要监控其它参数进行判断。

处理方法

- 减少亚松弛因子值。发散是由方程的非线性引起，而亚松弛因子是由线性稳定性分析得到，因此减少亚松弛因子可以让计算回到稳定域。
- 改善初始流场。可以先计算简化流场，再以简化流场为初始流场继续进行计算。如在多想流计算中，可以先计算连续相流场，再加入弥散相进行计算。

连续性方程不收敛

- 这是由于SIMPLE算法根据连续方程推导出压力修正方法求解压力。由于连续方程中流场耦合项被过渡简化，使得压力修正方程不能准确反映流场的变化，从而导致该方程收敛缓慢
- 解决方法：采用SIMPLEC算法。

学习资源

- FLUENT流体工程仿真计算实例与应用．韩占忠，王敬，兰小平．北京理工大学，2004.6
- 计算流体动力学分析——CFD软件原理与应用．王福军，清华大学
- FLUENT USER'S GUIDE 中文版
- FLUENT全功略

学习资源

- 哈尔滨工业大学（清洁能源论坛）
- http://www.ceclub.cn/cgi-bin/leobbs.cgi
- 流体中文论坛
- http://219.232.54.3/cgi-bin/LB5000/leobbs.cgi
- SimWe仿真论坛
- http://www.simwe.com/forum/
- 傲雪论坛
- http://www.aoxue.org/
- CFD ONLINE
- http://www.cfd-online.com/

建议学习方法

- 1、做完《FLUENT流体工程仿真计算实例与应用》中的例题；
- 2、自己动手模拟一个简单例子（最好有原始实验数据）；
- 3、到网上将新手入门版看一些精品贴；
- 3、针对自己的课题阅读FLUENT USER'S GUIDE 中文版，FLUENT全功略中需要使用的部分；
- 4、动手模拟，出问题到网上问。

谢谢